

Wechselwirkung von Fahrzeugdynamik und Kfz-Bordnetz unter Berücksichtigung der Fahrzeugbeherrschbarkeit

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Benjamin Hesse

aus

Bochum

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch

Tag der mündlichen Prüfung: 21.10.2011

So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muß sie für fertig erklären wenn man nach Zeit und Umständen das Mögliche getan hat.

Johann Wolfgang von Goethe

Am Ende einer solchen Arbeit kommt wohl zwangsläufig der Punkt an dem man innehält und zurückschaut auf den Weg, der zu diesem Ziel geführt hat, bevor man dann neue Herausforderungen annimmt. Rückblickend bleiben naturgemäß eher die positiven Erinnerungen im Gedächtnis. Man sollte sich jedoch auch an die Stellen erinnern, die nicht reibungslos gelaufen sind. Hier haben mir meine Familie, Kollegen oder auch Freunde immer wieder geholfen und ich möchte mich an dieser Stelle für diese Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dieter Schramm, der mir nicht nur die Chance gegeben hat als wissenschaftlicher Mitarbeiter an seinem Lehrstuhl zu arbeiten und mir dabei immer wieder fruchtbare Anregungen gegeben hat, sondern vor allem durch eine ambitionierte Zeitvorgabe für eine schnelle Bearbeitung meines Forschungsprojektes gesorgt hat.

Herrn Prof. Holger Hirsch danke ich für die Übernahme der Aufgabe des Zweitgutachters. Er konnte mir durch seine Sicht auf die Dinge an der ein oder anderen Stelle wertvolle Tipps geben.

Weiterer Dank gilt der Porsche AG. Zu nennen sind hier Herr Dr. Manfred Harrer sowie Herr Dr. Georg v. Tardy, die das Forschungsprojekt, das zu meiner Promotion geführt hat, ins Leben gerufen haben. In vielen Besprechungen sind aus ihrer Gruppe auch immer wieder interessante Anregungen für meine Arbeit gekommen.

Danken möchte ich auch meinen Kollegen vom Lehrstuhl für Mechatronik. Ich konnte bei den verschiedensten Problemen immer wieder auf das Wissen und die Erfahrung aus anderen Projekten zurückgreifen und habe diesen Wissensaustausch sehr genossen. Besonders nennen möchte ich Herrn Dr. Gregor Hiesgen mit dem ich viele Stunden bei dem Aufbau und der Verbesserung des Simulators verbracht habe und Herrn Martin Koppers der mir bei der Erstellung der Modelle eine große Hilfe war. Weiterhin möchte ich allen Studenten danken, die im Zuge ihrer Arbeiten oder als studentische Hilfskraft zum Teil mit sehr großem Einsatz zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen haben.

Besonders großen Anteil, nicht nur an der Fertigstellung dieser Arbeit, sondern an meinem gesamten Werdegang haben sicherlich meine Eltern. Danke für die stete Unterstützung und die Sicherheit, dass immer jemand helfend eingreift.

Kurzfassung

Die fortschreitende Elektrifizierung im Kraftfahrzeug stellt hohe Anforderungen an das klassische 14 V Bordnetz. Während das Bordnetz historisch zunächst dafür gedacht war, das Starten eines Fahrzeugs zu ermöglichen und während des Betriebs kleinere Verbraucher, wie etwa das Abblendlicht, zu betreiben, wurden in der näheren Vergangenheit eine Vielzahl weiterer elektrischer Verbraucher im Automobil eingeführt.

Die zu Beginn dieses Jahrhunderts noch viel diskutierte Einführung eines 42 V Bordnetz ist mittlerweile kein Thema mehr. Das vorhandene 14 V Bordnetz ist allerdings nicht in der Lage, sämtliche Verbraucher eines Fahrzeugs gleichzeitig mit ausreichend elektrischer Energie zu versorgen. Dies führt zu einer erheblichen Zahl von Fahrzeugpannen aufgrund von Elektrik-/Elektronikfehlern.

Zur Stabilisierung des Bordnetzes bei gleichzeitig voranschreitender Elektrifizierung werden verstärkt Energiemanagementsysteme eingesetzt, die die verknappte elektrische Leistung entsprechend verschiedener Kriterien optimal auf die vorhandenen Verbraucher im elektrischen Bordnetz eines Kfz verteilen sollen.

Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Energiemanagementsystem wendet aus der Literatur bekannte Ansätze auf den Spezialfall kurzzeitiger Hochleistungsverbraucher an. Hochleistungsverbraucher benötigen eine sehr hohe elektrische Leistung und zeichnen sich zudem durch teilweise große Leistungsgradienten aus. Diese Hochstromverbraucher sind darüber hinaus oftmals dadurch gekennzeichnet, dass sie neben diesen hohen Anforderungen an das elektrische Bordnetz direkt vom

Fahrer wahrnehmbar sind. Sie sind damit in doppelter Hinsicht interessant. Eine Funktionsbewertung solcher Verbraucher sollte daher auch einen realen Fahrer einbinden.

Zunächst durchgeführte Offline-Simulationen mit dem entwickelten Bordnetz- (management)modell zeigen beide Punkte am Beispiel der elektrischen Servolenkung (Electrical Power Steering, EPS) sehr deutlich. Die Bordnetzspannung sinkt in der Simulation ohne aktives Managementsystem bei definierten Testszenarien so weit ab, dass die EPS nicht mehr die optimale Lenkunterstützung bietet. Dies hat direkte Auswirkungen auf das erforderliche Handmoment des Fahrers. Das entwickelte Energiemanagementsystem kann in den verwendeten Szenarien dazu verwendet werden, die Bordnetzspannung so weit wie möglich zu stabilisieren. Dies führt zu einem deutlich reduzierten maximalen Handmoment. Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass nicht für jedes Szenario ein im Normalfall übliches Handmoment gewährleistet werden kann. Daraus ergibt sich die Frage, wie die auftretenden Handmomente bewertet werden und ob diese ggf. zu sicherheitskritischen Situationen führen.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wird der hierfür entwickelte Fahrsimulator verwendet. Damit ist es möglich, den Fahrer in einem realistischen Umfeld zu beobachten und während eines Tests gleichzeitig Modellgrößen sowie probanden-spezifische Werte aufzunehmen. Die deutliche Erhöhung des Handmoments (wie sie aufgrund der Bordnetzbelastung auftritt) wird im Simulator von den Probanden wahrgenommen und teilweise auch als sehr störend oder sogar gefährlich eingestuft. Die Messungen von Fahrzeuggrößen während der Studie im Simulator zeigen allerdings, dass sich die Spurführungsfähigkeit der Probanden durch eine plötzliche Erhöhung des Handmoments nicht verschlechtert.

Inhaltsverzeichnis

Notation	xi
1 Motivation und Aufbau der Arbeit	1
1.1 Motivation	1
1.2 Einordnung der Arbeit in den Gesamtkontext	5
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Das Kfz-Bordnetz und zukünftige Entwicklungen	7
2.1 Bordnetztopologien	7
2.1.1 Das klassische Ein-Batterie-Bordnetz	8
2.1.2 Moderne Bordnetzstrukturen	9
2.2 Komponenten und deren Leistungsdaten im Bordnetz	11
2.2.1 Generator	11
2.2.2 Energiespeicher	13
2.2.3 Batteriemodelle	15
2.2.4 Verbraucher im Bordnetz	19
2.3 Fahrdynamikabhängige elektrische Verbraucher	23
2.3.1 Elektrische Servolenkung	23
2.3.2 Fahrdynamikregelsystem (ESC)	27
2.4 Energiemanagement	28
2.4.1 Erzeugermanagement	31
2.4.2 Speichermanagement	32
2.4.3 Verbrauchermanagement	33
3 Abbilden des Gesamtsystems	41
3.1 Gesamtstruktur	41
3.2 Fahrzeugbewegung	43

3.3	Modellierung der Zahnstangenkraft	44
3.3.1	Reifenquerkräfte	44
3.3.2	Bohrmoment	47
3.4	Elektromechanische Komponenten	55
3.4.1	Elektrische Servolenkung	56
3.4.2	Electronic Stability Control (ESC)	62
3.5	Bordnetz	64
3.5.1	Grundlast	66
3.5.2	Generator	67
3.5.3	Batterie	76
3.6	Energiemanagementalgorithmus	81
3.6.1	Optimales Energiemanagement	82
3.6.2	Dynamische Prioritäten mit dezentraler Notfallschaltung	85
4	Simulation der Wechselwirkung von Fahrdynamik und Bordnetz	89
4.1	Definition geeigneter Testmanöver	89
4.1.1	Durchlenken im Stand	90
4.1.2	Doppelter Spurwechsel	91
4.1.3	Konditionierung des Bordnetzmodells	92
4.2	Bordnetzbelastung ohne Energiemanagement	94
4.3	Bordnetzbelastung mit Energiemanagementsystem	98
4.4	Implikationen für weitere Untersuchungen	101
5	Echtzeitsimulation unter Verwendung eines Simulators	103
5.1	Grundkonzept des Simulators	104
5.1.1	Softwarestruktur	108
5.1.2	Mensch-Maschine-Schnittstellen und Simulatorenbau	110
5.2	Verwendete Methoden und Messtechnik	115
5.2.1	Auswertung subjektiver Fahrerbewertung	115
5.2.2	Objektive Messung des Fahrerempfindens	115
5.2.3	Messung der Fahrzeuggrößen	117
6	Ergebnisse unter Berücksichtigung des realen Fahrers	119
6.1	Versuchsordnung	119
6.2	Stichprobe	121
6.3	Ergebnisse der Befragung	121
6.4	Vegetative Effekte	122
6.4.1	Kardiovaskuläre Reaktion	123
6.4.2	Elektrodermale Reaktion	124
6.5	Fahrzeugmessungen	125
6.6	Auswertung nach personenbezogenen Merkmalen	132
7	Zusammenfassung und weiterführende Aspekte	135
7.1	Zusammenfassung	135
7.2	Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit	137

7.3	Zukünftige Arbeiten	138
A	Zukünftige Entwicklungen im Bereich Elektromobilität	141
A.1	Funktionserweiterung durch Elektrifizierung	141
A.2	Elektromobilität	142
B	Versuchsreihen am Simulator	145
B.1	Zeitliche Reizschwelle an der Lenkung	145
B.2	Simulatorstudie zur Beurteilung der Lenkung	148

Notation

Verwendete Symbole

Systematik der Notation:

- ${}_T\mathbf{r}^{A,B}$: Ortsvektor von A nach B dargestellt in dem Koordinatensystem T
- ${}_T^E\mathbf{v}^A$: Geschwindigkeit des Punktes A relativ zu E dargestellt in dem Koordinatensystem T
- ${}_T^E v_x^A$: x-Geschwindigkeit des Punktes A relativ zu E dargestellt in dem Koordinatensystem T
- ${}_T^E\mathbf{a}^A$: Beschleunigung des Punktes A relativ zu E dargestellt in dem Koordinatensystem T
- ${}_T^E a_x^A$: x-Beschleunigung des Punktes A relativ zu E dargestellt in dem Koordinatensystem T
- ${}_T^U\boldsymbol{\omega}^T$: Winkelgeschwindigkeit von T in U dargestellt in dem Koordinatensystem T
- ${}_T^U\boldsymbol{\alpha}^T$: Winkelbeschleunigung von T in U dargestellt in dem Koordinatensystem T
- ${}_T\mathbf{F}^A$: Kraft mit Angriffspunkt A dargestellt in dem Koordinatensystem T
- ${}_T F_x^A$: Kraft in x-Richtung mit Angriffspunkt A dargestellt in dem Koordinatensystem T

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
Lateinische Buchstaben:		
A_0		Widerstandskonstante
$A_{21,22}$		Kostanten

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A_{BK}	m ²	Bremskolbenfläche
A_K	m ²	Kolbenfläche (ESC-Pumpe)
A_P		Konstante zur Berechnung des parasitären Batteriestroms
A_S	m ²	wirkende Fläche im Speicher (ESC)
B_F	T	magnetische Flussdichte in der Erregerwicklung
C	C	allgemeine Kapazität
C_0^*	As	Leerlaufkapazität bei 0°C
C_1	As	Hauptzweigkapazität
C_{20}	As	Nennkapazität bei 20-stündiger Entladedauer
C_{aktuell}	As	aktuelle Kapazität eines Energiespeichers
C_B	As	Kapazität eines Energiespeichers (Batterie)
C_N	As	Nennkapazität eines Energiespeichers
C_Θ	J	thermische Kapazität
E	J	Energie
F	N	Kraft
F_{EPS}	N	an Zahnstange wirkende Unterstützungskraft der EPS
F_{Reib}	N	Kraft aufgrund von Reibung an der Zahnstange
F_{Ritzel}	N	wirkende Kraft zwischen Ritzel und Zahnstange
$F_{x,P}$	N	Verdrängerkraft der Pumpe (ESC)
$F_{y,P}$	N	Kraft in Kolbenquerrichtung (ESC-Pumpe)
F_{FL}^{Latsch} $F_{x,y,z}$	N	x,y,z-Komponente der Kraft am linken Vorderrad im reifenfesten System FL
F_{ZS}	N	Zahnstangenkraft
G_{P0}	s	Konstante zur temperaturabhängigen Verluststromberechnung in der Batterie
H_F	$\frac{A}{m}$	magnetische Feldstärke in der Erregerspule des Generators
I	A	allgemeiner elektrischer Strom
I_{Aktor}	A	Aktorstrom
I_B	A	Batteriestrom: positiv beim Laden der Batterie
I_F	A	Strom in Erregerspule des Generators

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
I_G	A	Generatorstrom: positiv für vom Generator abgegebenen Strom
I_m	A	Hauptzweigstrom
I_N	A	Nennstrom
I_{nom}	A	Nominalstrom
I_P	A	Verluststrom durch parasitären Zweig in der Batterie
I_V	A	Verbraucherstrom: positiv bei Leistungsentnahme aus dem Bordnetz
K_E	$\frac{V}{^{\circ}C}$	Konstante zur temperaturabhängigen Spannungsanpassung
$K_{C0,1,2}$		Konstante (in späterer Parameteridentifikation zu bestimmen)
\mathcal{L}		Latschebene
P	W	allgemeine Leistung
P_{elektr}	W	elektrische Leistung
P_{EPS}	W	momentane elektrische Leistung der EPS
P_{ESC}	W	momentane elektrische Leistung des ESC
P_{max}	W	maximale Leistung einer Komponente
P_{mech}	W	mechanische Leistung
P_s	W	Leistungsverluste über R_0 und R_2
P_{\odot}	W	durchschnittliche Leistung einer Komponente
Q	C	elektrische Ladung
Q_B	C	Batterieladung
Q_{B0}	C	initiale Batterieladung
Q_{nom}	C	Nominalladung
R	Ω	allgemeiner elektrischer Widerstand
R_0	Ω	Klemmenwiderstand im Batteriemodell
R_0^{100}	Ω	Klemmenwiderstand des Batteriemodells bei $SOC = 1$
R_1	Ω	Hauptzweigwiderstand (Batteriemodell)
R_2	Ω	Hauptzweigwiderstand (Batteriemodell)
R_B	Ω	elektrischer Widerstand der Batterieleitung
R_G	Ω	elektrischer Widerstand der Generatorleistung
R_L	Ω	elektrischer Widerstand der kumulierten Verbraucher

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
R_V	Ω	elektrischer Widerstand der Leitung zu den Verbrauchern
SOC		Ladezustand (State of Charge) eines Energiespeichers
SOH		Alterungszustand (State of Helth) eines Energiespeichers
T	Nm	mechanisches Moment
T^{Latsch}	Nm	Drehmoment am Rad
T_{Bohr}	Nm	Bohrmoment
T_{Br}	Nm	Bremsmoment
T_G	Nm	Generatorlastmoment
T_L	Nm	Lenkradmoment (Handmoment beim Lenken)
T_P	Nm	Lastmoment des E-Motors aufgrund Pumpenrotation (ESC)
U	V	allgemeine elektrische Spannung
U_0	V	Ruhespannung eines Akkumulators
U_{Aktor}	V	am Aktor anliegende Spannung
U_B	V	Klemmenspannung einer Batterie
U_F	V	Erregerspulenspannung im Generator
U_G	V	Generatorspannung
U_{ind}	V	rückinduzierte Spannung aufgrund Aktorbewegung (EPS)
U_L	V	Spannungsabfall über alle kummulierten Verbraucher
U_{LA}	V	Spannungsabfall aufgrund der Induktivität der Aktorwicklung (EPS)
U_{LF}	V	Spannungsabfall über Induktivität in Erregerspule (Generator)
U_{Neg}	V	Potential zwischen Spulen und negativer Generatorklemme
U_{P0}	V	Konstantspannung
U_{PN}	V	Spannung an parasitärem Zweig
U_{Pos}	V	Potential zwischen Spulen und positiver Generatorklemme
U_{RA}	V	Spannungsabfall aufgrund des ohmschen Widerstands in der Aktorwicklung der EPS
U_{RB}	V	Spannungsabfall an der Batterieleitung

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
U_{RF}	V	Spannungsabfall über ohmschen Widerstand in Erregerspule (Generator)
U_{RG}	V	Spannungsabfall an der Generatorleitung
U_{RV}	V	Spannungsabfall an der Verbraucherleitung
U_V	V	Steuerspannung an den Ventilen (ESC)
U_Z	V	Zellenspannung eines Akkumulators
$U_{Z,0}$	V	Leerlaufspannung der Batteriezelle,
$U_{Z,0}^{100}$	V	Leerlaufspannung der Batteriezelle bei voller Ladung
\dot{V}_{Br}	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom in den Bremszylinder
\dot{V}_P	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom aus der Pumpe (ESC)
V_S	m^3	Gesamtvolumen des Speichers (ESC)
\dot{V}_S	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Volumenstrom vom Speicher zu den Ventilen (ESC)
$V_{S,F}$	m^3	Fluidvolumen im Speicher (ESC)
b_{Latsch}	m	Latschbreite
c_L		Steifigkeit des Hydrauliksystems
c_{Latsch}	$\frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	Torsionssteifigkeit des Latsches
c_{LS}	$\frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	Torsionssteifigkeit der Lenksäule
c_S	$\frac{\text{N}}{\text{m}}$	Federsteifigkeit des Speichers (ESC)
d_V	m	veränderlicher Blendendurchmesser (Ventile ESC)
i_A		Übersetzung von EPS Aktor zur Zahnstange
i_i	A	Wechselstrom in Statorspule
i_L		Lenkübersetzung
k_{ind}	$\frac{\text{Vs}}{\text{rad}}$	Induktionskoeffizient
l_{eff}	m	effektiver Lenkhebel
m_{eff}	kg	effektive Masse der Zahnstange
n	$\frac{1}{\text{min}}$	allgemeine Drehzahl eines rotierenden Teils
n_G	$\frac{1}{\text{min}}$	Generatordrehzahl
n_P	$\frac{1}{\text{min}}$	Drehzahl der Hydraulikpumpe (ESC)
p		Polpaarzahl des Generators (typisch 6 oder 7)
p_{Br}	Pa	Bremsdruck
p_{dyn}	Pa	Fluiddruck im Kolben (ESC-Pumpe)
p_S	Pa	Fluiddruck im Druckspeicher (ESC)

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
q_e		Entladegrad
q_{ZS}	m	Verschiebung der Zahnstange
r_{Br}	m	Radius einer Bremsscheibe
r_P	m	Exzentrizität des Pumpenantriebs (ESC)
r_{Rad}	m	mittlerer Radradius
s		Schlupf eines Reifens
s_{Pegel}	m	Füllstand des Speichers (ESC)
t	s	Zeit
$u_{i,ind}$	V	induzierte Wechselspannung in Statorspule
$u_{Pos,i}$	V	Potential zwischen der Spule i und der positiven Generatorklemme
$u_{Neg,i}$	V	Potential zwischen der Spule i und der negativen Generatorklemme
Griechische Buchstaben:		
Δ		gibt eine Differenz zwischen zwei Werten an
Θ	K	Temperatur
Θ_a	°C	Umgebungstemperatur
Θ_E	°C	Elektrolyttemperatur
Θ_{EF}	°C	Elektrolytgefriertemperatur
Θ_{init}	°C	Anfangstemperatur
Φ_A	Wb	auf den Anker (EPS Aktor) wirkender magnetischer Fluss
Φ_{eff}	Wb	effektiv wirksamer magnetischer Fluss (Generator)
Φ_F	Wb	magnetischer Fluss durch Spulenstellung (Generator)
Φ_k	Wb	Kompensation des magnetischen Flusses durch Spulenstrom (Generator)
α	rad	Schräglaufwinkel eines Rades
δ	rad	Lenkwinkel
δ_L	rad	Lenradkwinkel
δ_{Latsch}	rad	Verdrehung der Latschebene
η		Wirkungsgrad

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
κ		Isentropenexponent des im Speicher verwendeten Gases
μ_{Br}		Gleitreibungskoeffizient Bremsanlage
ξ		empirisch ermittelte Konstante (ESC Hydraulikmodell)
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte des Fluids
φ_P	rad	Drehwinkel des Pumpenantriebs (ESC)
φ_{Ritzel}	rad	Verdrehung des Ritzels
τ_1	s	Zeitkonstante des Hauptzweigs
τ_P	s	Zeitkonstante des parasitären Zweigs im Batteriemodell
ω	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Winkelgeschwindigkeit
ω_A	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Winkelgeschwindigkeit des Aktors (EPS)
ω_{int}	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	interne Winkelgeschwindigkeit des elektr. Teilsystems im Generator
ω_z^{Rad}	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Winkelgeschwindigkeit eines Rades um die z-Achse des radfesten Systems
ω_y^{Rad}	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Winkelgeschwindigkeit eines Rades um die y-Achse des radfesten Systems

KAPITEL 1

Motivation und Aufbau der Arbeit

Zur Einführung in die Thematik wird hier zunächst die zugrunde liegende Motivation erläutert. Die vorliegende Arbeit wird kurz in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet und strukturell beschrieben.

1.1 Motivation

Ein modernes Automobil muss im Spannungsfeld von Funktions- und Komfortgewinn bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung und Gewichtsreduktion bestehen. Diese zunächst widersprüchlichen Forderungen werden vermehrt durch die Elektrifizierung verschiedener Komponenten im Kraftfahrzeug (Kfz) erreicht. Der stetig steigende Anteil der Elektrik am Wert eines Neuwagens belegt diesen allgemeinen Trend [101].

Effizienzsteigerung
und
Funktionsgewinn

Bereits 2004 wurde von DUDENHÖFFER in [31] prognostiziert, dass bei unverändertem Energiemanagement im Kraftfahrzeug die Zahl der Pannen aufgrund von Elektrikfehlern auf über 40 % ansteigen wird. Der heutige Grad der Elektrifizierung bringt gerade im Segment der Oberklassefahrzeuge das elektrische Bordnetz an seine Grenzen. Pannenstatistiken des ADAC aus den vergangenen Jahren zeigen deutlich, dass der prozentuale Anteil von Elektrik- bzw. Elektronikfehlern (vgl. Abb. 1.1) sogar über dem von DUDENHÖFFER prognostizierten Niveau liegt.

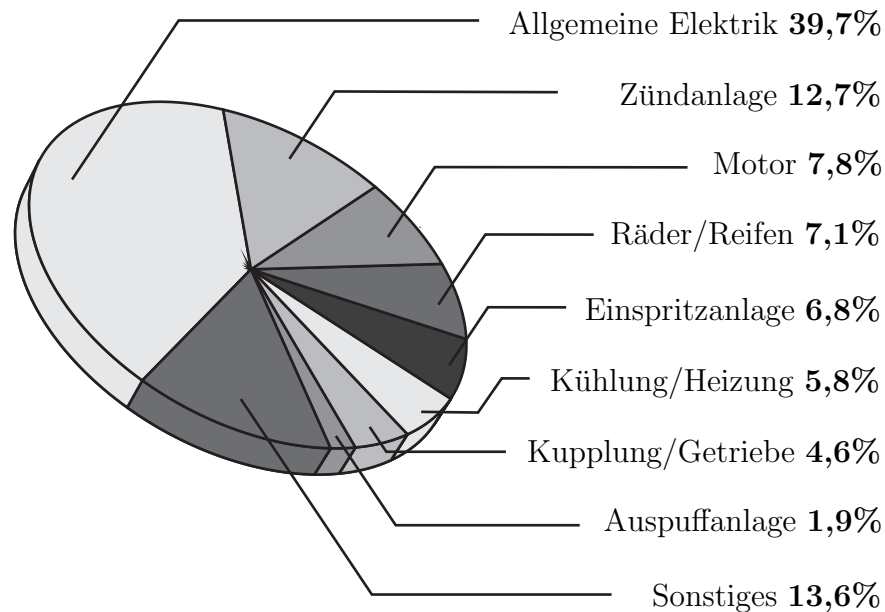


Abbildung 1.1: Pannenstatistik des ADAC von 2007 [9]

Elektrik ist
Hauptgrund für
Pannen

Die Pannenstatistik aus Abbildung 1.1 belegt eindeutig, dass die Elektrik mittlerweile die meisten Fahrzeugausfälle verursacht. Werden die Probleme mit der Zündanlage, welche oftmals ebenfalls elektrotechnischer Natur sind, hinzugerechnet, so ergibt sich ein Anteil von mehr als 50 % an allen Fehlern für das Jahr 2007. Seitdem sind laut ADAC die Fehler aufgrund der Elektrik leicht zurückgegangen. Sie liegen aber unverändert auf einem sehr hohen Niveau von ca. 45 % aller Pannen im Jahr 2010 [10]. Dabei stellen Pannen an Generator, Anlasser und Batterie mit rund 42 % aller Defekte den weitaus größten Anteil dar. Probleme der Elektrik verursachen heute insgesamt knapp die Hälfte aller Fahrzeugpannen.

Ursachen für
Elektro-Pannen

Dieser sehr große Anteil hat zwei Ursachen. Zunächst steigt natürlich mit der Anzahl elektrischer Komponenten die Wahrscheinlichkeit, dass eine dieser Komponenten ausfällt. Entscheidender ist jedoch, dass die Vielzahl elektrischer Verbraucher das weiterhin verbreitete klassische 14 V Bordnetz bis an seine Leistungsgrenzen (teilweise auch darüber hinaus) belastet. Wie in Abbildung 1.2 zu sehen ist, stieg der elektrische Leistungsbedarf im Kfz in den vergangenen Jahren deutlich und liegt abhängig von der Fahrzeugklasse mittlerweile bei über 3 kW.

Leistungsbilanz
oft nicht
ausgeglichen

Im Gegensatz hierzu hat sich die Generatorleistung deutlich weniger erhöht. Dies hat dazu geführt, dass die langfristigen Ladebilanzen für ein Kfz-Bordnetz zwar weiterhin positiv sind, aber immer öfter Fälle auftreten, in denen der Generator die Verbraucherleistung nicht mehr liefern kann. Im Rahmen dieser Arbeit ist der kurzzeitige elektrische Verbrauch neben der generellen Leistungsbilanz von besonderem Interesse. Dieser wird maßgeblich von innovativen Hochstromverbrauchern

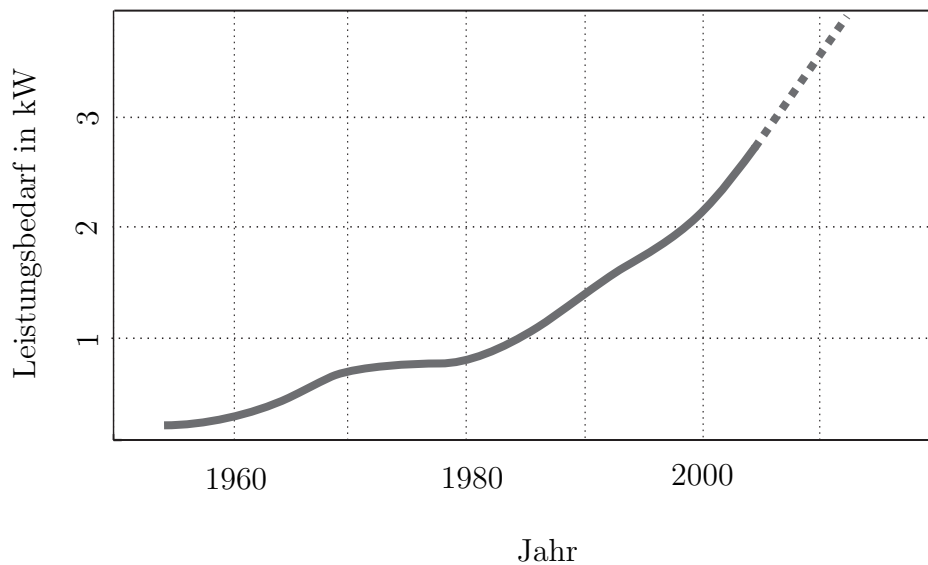


Abbildung 1.2: Durchschnittlicher elektrischer Leistungsbedarf im Kfz angelehnt an [100]

mitbestimmt und liegt nach FABIS [34] für Oberklassefahrzeuge bei bis zu 14 kW. Da der Generator eine deutlich niedrigere Leistungsgrenze hat, muss die Batterie in solchen Fällen die Differenz liefern. Hierdurch kommt es immer häufiger zu entladenen Batterien und Leistungsengpässen. Dies führt aufgrund der höheren Belastung der Batterie immer öfter zu deren Versagen und der zu beobachteten Erhöhung elektrischer Defekte.

Gerade im Zusammenhang mit innovativen Hochleistungsverbrauchern im Kfz-Bordnetz ist der aufgezeigte Trend und die Ausreizung des Bordnetzes zu betrachten. Innovative Hochleistungsverbraucher sind oft solche Verbraucher, die Einfluss auf die Fahrzeugdynamik nehmen. Dazu gehören elektrische Lenksysteme, ein elektrohydraulisches ESC¹ (Electric Stability Control) oder auch aktive Fahrwerkskomponenten. Während ein nicht startendes Fahrzeug aufgrund eines Batteriedefekts zwar ärgerlich für den Fahrzeughalter ist, können plötzlich auftretende Energiemangelsituationen im Fahrbetrieb potentiell zu sicherheitskritischen Situationen führen.

Sicherheitskritische
Situationen
durch
Energiemangel?

Systeme wie z.B. die elektrische Servolenkung haben in Serienfahrzeugen Einzug gehalten. Der hierdurch zu erreichende Funktionsgewinn, etwa im Sektor der Spurhalteassistenten, oder auch Vorteile im Packaging und Gewicht führen dazu, dass elektrische Lenksysteme auch im Oberklassesegment eingesetzt werden sollen. Bei den meist schweren Fahrzeugen der Oberklasse wird für ein elektrisches Lenksystem aufgrund der hier wirkenden Kräfte eine deutlich höhere elektrische Leistung

Komforteinbußen
aufgrund
verminderter
Verfügbarkeit

¹Oft unter dem Markennamen ESP (Elektronisches Stabilitäts Programm) bekannt

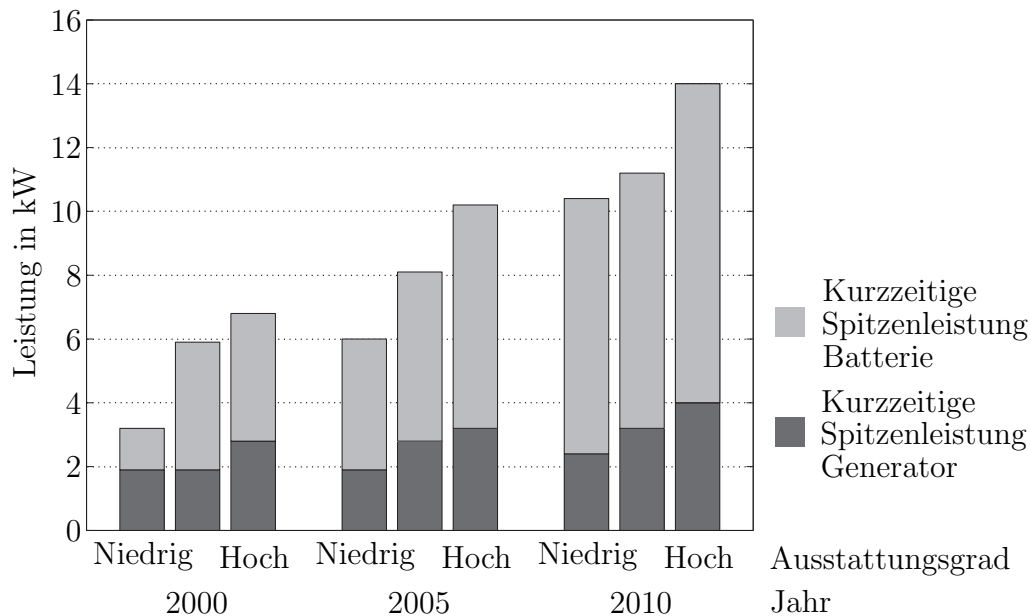


Abbildung 1.3: Spitzenleistungsbedarf im Kfz [34]

benötigt als beim Fahrzeug der Mittelklasse [85]. Zusätzlich ist das Bordnetz eines Oberklassefahrzeugs aufgrund der vielen eingesetzten Komfortkomponenten bereits stark belastet, so dass es verstärkt zu Energiemangelsituationen kommen kann. Systeme, die zwar den Komfort verbessern und damit zunächst einen Kaufanreiz geben, auf der anderen Seite jedoch die Verfügbarkeit elektrischer Komponenten herabsetzen, sind nicht akzeptabel. Ansätze das Bordnetz durch die Verwendung weiterer Komponenten zu stabilisieren, wie es u.a. von PRÖBSTLE in [76] vorgeschlagen wird, bedeuten eine Erhöhung der Herstellungskosten und werden daher nur ungern umgesetzt.

Energiemangel-
situationen
vermeidbar?

Die entscheidende Frage ist demnach, ob es Möglichkeiten gibt, Energiemangelsituationen ohne konstruktive Maßnahmen zu vermeiden oder wie mit einer solchen Mangelsituation umgegangen wird, wenn diese auftritt. Grundsätzlich könnte durch die Einführung leistungstärkerer Energiequellen und -speicher die beschriebene Problematik entschärft werden. Die Bauweise und vor allem die Größe der Kfz-Generatoren setzt der Leistungsstärke jedoch eine Obergrenze. Zudem würde die Dimensionierung auf die geforderte Maximalleistung ein Mehrgewicht des Fahrzeugs bedeuten, das gerade im Hinblick auf die zur Zeit herrschende CO_2 -Debatte nicht akzeptabel wäre. Der Ansatz, die verfügbare Leistung möglichst effizient im Sinne eines Energiemanagementsystems zu nutzen, bleibt daher bestehen. Dabei gibt es verschiedene Ziele unterschiedlicher Priorität mit teilweise entgegengesetzten Forderungen. Die Verfügbarkeit sicherheitsrelevanter Systeme muss stets gewährleistet werden und der Fahrer sollte möglichst keinerlei Komforteinbußen erleben.

Für die Entwicklung im Bereich der Elektromobilität sowie der Hybridtechnologie ist damit zu rechnen, dass sich das Problem der Leistungsbereitstellung verschiebt. Aufgrund der zu erwartenden hohen Spannungsniveaus können auch hohe kurzfristige Leistungen bereitgestellt werden. Ein erhöhter Bedarf elektrischer Energie wird die viel diskutierte geringe Reichweite eines Elektrofahrzeugs allerdings zusätzlich einschränken, so dass weiterhin nach einer optimalen Energieverteilung gesucht werden muss [63]. Für das klassische Kfz mit Verbrennungsmotor, welches auf absehbare Zeit weiterhin den Automobilmarkt dominieren wird, bleibt die beschriebene Problematik bestehen.

Einfluss
elektrischer
Antrieb

1.2 Einordnung der Arbeit in den Gesamtkontext

Ausgehend von bestehenden Bordnetzmanagementsystemen, welche die Optimierung des Energiebedarfs über einen Fahrzyklus zum Ziel haben, wird in dieser Arbeit das Leistungsmanagement für kurzzeitige Hochstromverbraucher betrachtet. Eine Kopplung der Leistungsaufnahme verschiedener Verbraucher mit dem Fahrzeugzustand und den Fahrereingaben ist dabei von besonderem Interesse. Dabei werden die Grenzen des klassischen 14 V Bordnetzes untersucht und ausgehend von existierenden Vorgehensweisen zum Management des Bordnetzes ein Algorithmus entwickelt, der in der Lage ist, auch kurzzeitige Hochstromverbraucher angemessen zu berücksichtigen.

Erweiterung
bestehender
Bordnetzmanage-
mentsysteme

In offline-Simulationen wird gezeigt, dass dieser Algorithmus auch in Extremsituationen in der Lage ist, das Bordnetz stabil zu halten. Diese Simulationen ergeben, dass real in Fahrzeugen eingebaute Hochstromverbraucher (speziell die elektrische Servolenkung EPS) in solchen Extremsituationen nicht immer in der Lage sind, den gewünschten Komfort für den Fahrer aufrecht zu erhalten. Daher wurde in einer simulatorgestützten Analyse untersucht, ob ein Fahrer diesen Komfortverlust bemerkt und wie er ihn bewertet. Zudem wurde untersucht, ob die Einschränkung der Funktion der EPS so groß ist, dass die Spurführungsfähigkeit eines Fahrers merklich verschlechtert wird, was zu einer gefährlichen Situation führen könnte.

Echtzeitsimulation
zur Integration
des Fahrers

Hierzu wurde der Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen als Werkzeug zur menschenzentrierten Entwicklung verwendet, welches es ermöglicht, den Fahrer in den Bewertungsprozess einzubinden und Fragen zur subjektiven Beurteilung einer Situation zu beantworten.

Für die Entwicklung elektrischer Hochstromverbraucher aber auch elektrischer Antriebskonzepte stellt die geleistete Arbeit, gerade durch die Möglichkeit der HIL²

HIL²

Echtzeitsimulation² des Bordnetzes, einen Schritt zur weiterführenden Untersuchungen dar. Sie ermöglicht Prüfstände, bei denen sowohl neue Hardwarekomponenten als auch zeitgleich der Fahrer in den Entwicklungsprozess eingebunden werden können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Einführung

Die vorliegende Arbeit kann in drei Teile unterteilt werden. Der erste Teil, bestehend aus Kapitel 2, stellt eine Einführung in die Thematik der automobilen Bordnetze dar. Es werden Trends, Chancen sowie damit einhergehende Herausforderungen für das Ingenieurwesen identifiziert.

Bordnetzanalyse

Der zweite Teil dieser Arbeit besteht aus den Kapiteln 3 und 4. In Kapitel 3 erfolgt eine genaue modelltechnische Betrachtung des klassischen Bordnetzes unter dem Gesichtspunkt der Energieknappheit. Da schon anfängliche und überschlägige Betrachtungen der Leistungsbilanz in einem Bordnetz offenlegen, dass bereits heutige Bordnetze im Betrieb zunehmend überlastet sind, werden Strategien zum Bordnetzmanagement erläutert und ausgehend von in der Literatur verbreiteten Ansätzen ein Energiemanagementalgorithmus entwickelt, der auch beim Einsatz kurzfristiger Hochstromverbraucher in der Lage ist, das Bordnetz stabil zu halten. Kapitel 4 stellt anhand der Ergebnisse von offline-Simulationen die Wechselwirkung innovativer Hochstromverbraucher, wie z. B. der elektrischen Servolenkung, mit der Fahrzeugdynamik sowie dem Bordnetz bei Anwendung des Algorithmus dar.

Simulatorstudie

Da sich hierbei zeigt, dass eingesetzte Hochstromverbraucher (in diesem Fall speziell die EPS) selbst bei sehr guter Stabilität des Bordnetzes in Extremsituationen nicht immer in der Lage sind, die eigentlich von ihnen gewünschte Assistenzfunktion in vollem Umfang zu liefern, wird in einem dritten Teil dieser Arbeit untersucht, wie diese Einschränkungen von Fahrern wahrgenommen werden und ob sich Änderungen des Fahrverhaltens ergeben. Kapitel 5 stellt den hierzu als Werkzeug verwendeten Simulator vor. In Kapitel 6 werden die im Simulator durchgeführten Untersuchungen detailliert beschrieben. Hierbei kommen neben klassischen ingenieurtechnischen Messungen auch Methoden aus der Psychologie zum Einsatz, die es ermöglichen, das subjektive Fahrerempfinden während der Untersuchungen zu quantifizieren. Kapitel 6 schließt mit der Auswertung und Bewertung der erzielten Ergebnisse.

²Mit dem Term HIL² wird hier die klassische HIL-Technik (Hardware In the Loop unter Einbeziehung des Fahrers (Human) bezeichnet.

KAPITEL 2

Das Kfz-Bordnetz und zukünftige Entwicklungen

Die vorliegende Arbeit behandelt die Wechselwirkung von Kfz-Bordnetz und Fahrzeugdynamik. Im folgenden Kapitel werden zunächst unterschiedliche Bordnetztopologien und Entwicklungstrends erläutert. Dabei werden verschiedene Schlüsselkomponenten im Bordnetz aus einer eher funktionalen Sichtweise diskutiert.

2.1 Bordnetztopologien

Das Bordnetz¹ eines Kfz setzt sich grundsätzlich aus einem oder mehreren Energiequellen²(Generator(en)), Energiespeichern (Batterie(n), Doppelschichtkondensator(en)) und einer Vielzahl elektrischer Verbraucher zusammen. Der Generator

Grundlegende
Komponenten

¹Grundsätzlich werden im Kfz Leistungsbordnetze und solche zum Informationsaustausch unterschieden. Diese Arbeit beschränkt sich auf das Leistungsbordnetz im Kfz. Der Begriff Bordnetz bezieht sich daher im Rahmen dieser Arbeit lediglich auf das Leistungsbordnetz.

²Es handelt sich bei den Energiequellen im elektrischen Bordnetz eines Kfz natürlich um Energiewandler, die mechanische in elektrische Energie wandeln. Der physikalisch nicht korrekte Term Energiequelle ist trotzdem in der Literatur weit verbreitet und wird daher auch hier verwendet.

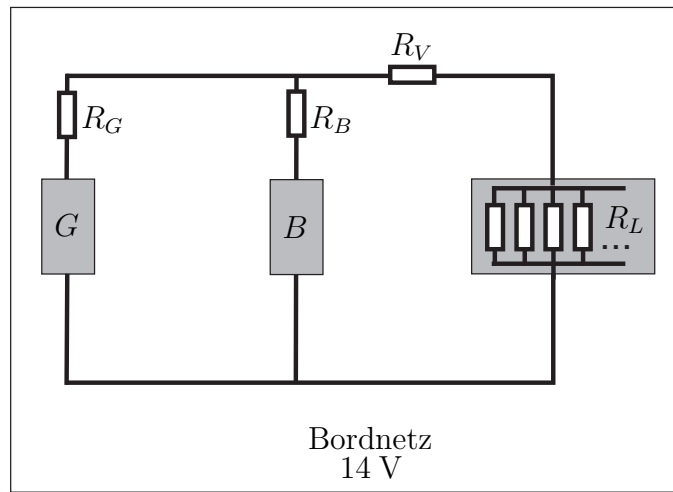


Abbildung 2.1: Ein-Batterie-Bordnetz [34]

liefert als einzige Energiequelle im Bordnetz während des Fahrbetriebs im Optimalfall den Strom für alle elektrischen Verbraucher. Zusätzlich muss der Ladestrom der Batterie bereitgestellt werden [84].

Übersteigt der Verbraucherstrom den vom Generator lieferbaren Strom, so tritt die Batterie als zusätzlicher Energielieferant auf. Die Bordnetzspannung sinkt ab und die Batterie wird entsprechend der gelieferten Batterieleistung entladen.

Im Folgenden wird das klassische 14 V Bordnetz diskutiert. Dabei wird auf die grundsätzliche Topologie, die Funktionsweise sowie seine Vor- und Nachteile eingegangen. Mögliche Weiterentwicklungen der Bordnetztopologien werden zudem kurz umrissen.

2.1.1 Das klassische Ein-Batterie-Bordnetz

14 V Bordnetz

In den meisten heutigen Kfz werden weiterhin klassische Ein-Batterie-Bordnetze verwendet. Das klassische Bordnetz ist durch eine Spannung von 14 V und eine Batterie mit einer Nennspannung von 12 V gekennzeichnet. In Abbildung 2.1 wird die einfache Topologie eines Ein-Batterie-Bordnetzes dargestellt.

Aufbau Ein-Batterie- Bordnetz

Der Generator (G) liefert im Optimalfall den gesamten benötigten Strom. Dieser setzt sich aus dem Ladestrom der Batterie (B) und dem gesamten Verbraucherstrom über die Verbraucher (R_L) zusammen und soll möglichst während des gesamten Fahrbetriebs geliefert werden. Es treten gerade in modernen Kfz mit hohem Ausstattungsgrad allerdings immer wieder Situationen auf, in denen die Batterie als Energielieferant neben den Generator treten muss, um den gesamten Verbraucherstrom zu liefern. Mit Hilfe der Spannungsregelung im Generator kann

über einen normalen Fahrzyklus hinweg in den Grenzen der maximalen Generatorleistung allerdings sichergestellt werden, dass die Batterie immer hinreichend gut geladen ist, so dass die maximale Funktionsverfügbarkeit aller Verbraucher erreicht wird. Damit eine zuverlässige Energieversorgung über das Bordnetz sichergestellt werden kann, muss die mittel- bis langfristige Ladebilanz der Batterie unabhängig vom Fahrzyklus stets positiv sein [34]. Lediglich für kurze Zeiträume ist eine negative Ladebilanz zulässig.

Ladebilanz

2.1.2 Moderne Bordnetzstrukturen

Das heute verwendete 14 V-Bordnetz wurde eingeführt, als die im Kfz benötigte Leistung das Leistungsangebot des bis dahin eingesetzten Bordnetzes mit einer 6 V-Batterie überstieg [84]. Seit dieser Anpassung der Bordnetzspannung vor über 30 Jahren ist die Spannung von 14 V Standard im Kfz. Verglichen mit den häufigen und schnellen Innovationen im Kfz ist dies eine relativ lange Zeitspanne. Nach BOSCH (2002, [84]) muss das etablierte 14 V-Bordnetz sich widersprechenden Anforderungen genügen. Während des Startvorgangs fließen, verursacht durch den Starter, Ströme von bis zu 500 A. Da der Strom während des Startvorgangs aus der Batterie entnommen wird, bedingt das Starten eine Absenkung des Spannungsniveaus im Bordnetz und wirkt sich u. U. negativ auf einige Verbraucher aus [84]. Im Gegensatz dazu wird im normalen Fahrbetrieb meist nur eine geringe elektrische Leistung benötigt. Es treten aufgrund moderner Hochstromverbraucher im Kfz allerdings auch während des Fahrbetriebs immer wieder Situationen auf, in denen zum Startvorgang vergleichbare Ströme fließen. Im Gegensatz zum Startvorgang ist bei laufendem Motor der Generator allerdings als Energiequelle verfügbar.

Weitere Leistungssteigerung erwartet

Durch die steigende Zahl elektrischer Komponenten mit zum Teil hohen Spitzenleistungen muss in zukünftigen Bordnetzsystemen damit gerechnet werden, dass es verstärkt zu Situationen kommt, in denen der Generator alleine nicht die geforderte Verbraucherleistung liefern kann. Es muss also nach Energiequellen und vor allem Energiespeichern gesucht werden, die auch dem erhöhten zu erwartenden Leistungsbedarf gerecht werden. Zum einen werden daher die herkömmlichen Batterien optimiert. Zum anderen werden immer öfter innovative Energiespeicher wie der Doppelschichtkondensator als mögliche Ergänzung diskutiert [106]. Vor dem Hintergrund der öffentlichen Diskussion zur CO₂-Emission, wird der Wunsch nach einer Energieeinsparung durch den Einsatz von Techniken wie Stopp-Start oder der Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation) immer stärker. Die Entwicklungen hybrider oder batterieelektrischer Antriebsstränge ermöglichen in diesem Umfeld neue Perspektiven. Dabei treten verstärkt Situationen auf, in denen große Ströme fließen. Die auftretenden hohen Ströme (z. B. durch die Rekuperation)

Anforderung Energiespeicher

Rekuperation gewünscht

müssen vom Bordnetz/Energiespeicher sicher aufgenommen oder bereitgestellt werden [86].

14 V-Bordnetz
langfristig nicht
ausreichend?

Nach PFAB [75] rechnete BMW 1999 noch damit, dass die Leistungsgrenze für Generatoren im klassischen 14 V-Bordnetz bei ca. 2,5 kW liegt. Dieser Wert ist mittlerweile erreicht. FABIS (2006, [34]) geht bereits von einer etwas positiveren Entwicklung mit Generatoren von bis zu 3 kW Maximalleistung aus. Auf der Basis heutiger Entwicklungen und Trends (vgl. Abb. 1.2) ist jedoch mit einem noch höheren Leistungsbedarf zu rechnen. Zur Einführung einiger innovativer Systeme müsste zwangsläufig die Bordnetzspannung erhöht werden. Für andere, wie etwa die elektrische Servolenkung, würde eine Anhebung der Bordnetzspannung eine Verbesserung oder Sicherstellung der Funktionalität ermöglichen. Dennoch scheint die noch vor wenigen Jahren angekündigte schnelle Einführung des 42 V-Netzes aus verschiedenen Gründen mittlerweile nicht mehr aktuell zu sein. Im Zuge der elektrischen Antriebstechniken werden jedoch zunehmend Mehrspannungsbordnetze diskutiert. Diese werden mit der fortschreitenden Hybridisierung und den entwickelten batterieelektrischen Fahrzeugen in ihrer Bedeutung deutlich steigen.

Optimierte
Nutzung
elektrischer
Energie

Für das weiterhin gebräuchliche 14 V-Bordnetz werden nunmehr vermehrt große Anstrengungen betrieben, um die knappe elektrische Energie optimal im Bordnetz zu verteilen und zu nutzen. Diese Energiemanagementsysteme sollen zum einen eine Effizienzsteigerung, zum anderen die Sicherstellung aller relevanten Funktionen garantieren. Während Energiemanagementsysteme bisher oft für den Ruhestromverbrauch und optimierte Energieverbräuche ausgelegt waren, wird der Bereich der kurzzeitigen Hochstromverbraucher immer wichtiger.

Weitere
Topologien
denkbar

Die in diesem Kapitel diskutierte klassische Bordnetztopologie ist zwar weiterhin die am weitesten verbreitete; es sind allerdings wie bereits angesprochen, gerade vor dem Hintergrund der jüngsten Entwicklungen hybrider oder elektrischer Antriebsstränge, verschiedene Topologien denkbar. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit spielen sie allerdings nur eine untergeordnete Rolle, da hier das klassische 14 V-Bordnetz im Vordergrund steht.

2.2 Komponenten und deren Leistungsdaten im Bordnetz

Der in Abschnitt 2.1 dargestellte Aufbau des elektrischen Leistungsbordnetzes besteht aus wenigen Grundbausteinen. Diese sind nach SCHÖTTLE (1996, [93]) wie in Abschnitt 2.1 bereits erwähnt: Grundbausteine

- Energiequellen,
- Energiespeicher und
- Verbraucher.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst heutige Generatoren und Energiespeicher aus einer eher funktionalen Sicht erläutert, bevor dann näher auf verschiedene, im Bordnetz eingesetzte, Verbraucher eingegangen wird.

2.2.1 Generator

Die im Kfz üblicherweise eingesetzten Generatoren sind nach BOSCH (2002, [84]) Drehstrom-Synchrongeneratoren. Aufgrund der Auslegung der Bordnetze anhand mittlerer Verbraucherleistungen und der zu beobachtenden starken Auslastung des Bordnetzes ist gerade bei Fahrzyklen mit häufigen und langen Standzeiten und eher niedrigen Drehzahlen (z. B. Stadtverkehr oder Staufahrten) wichtig, dass der Generator als einzige elektrische Energiequelle auch bei diesen ungünstigen Zyklen genügend elektrische Energie bereitstellt. Heutige Kfz-Generatoren können schon bei Leerlaufdrehzahl mehr als ein Drittel ihrer Nennleistung abgeben, wodurch eine ungewollte Entladung der Batterie in den genannten Szenarien im Normalfall vermieden werden kann. Der maximale Generatorstrom ist, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, von der Generatordrehzahl abhängig, womit auch die maximale Generatorleistung eine Funktion der Motordrehzahl ist [84]. Maximaler Generatorstrom

In Abbildung 2.2 bezeichnet n_{Leer} die Leerlaufdrehzahl und n_{max} die Höchstdrehzahl des Generators. Der erzeugte dreiphasige Generatorstrom muss zu Gleichstrom konvertiert werden, um im Bordnetz nutzbar zu sein. Dies wird über einfache Gleichrichterschaltungen gewährleistet [84]. Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, kommt es für den maximal abgebbaren Strom bei hohen Drehzahlen zu keiner merklichen Erhöhung mehr. Generatorausnutzung

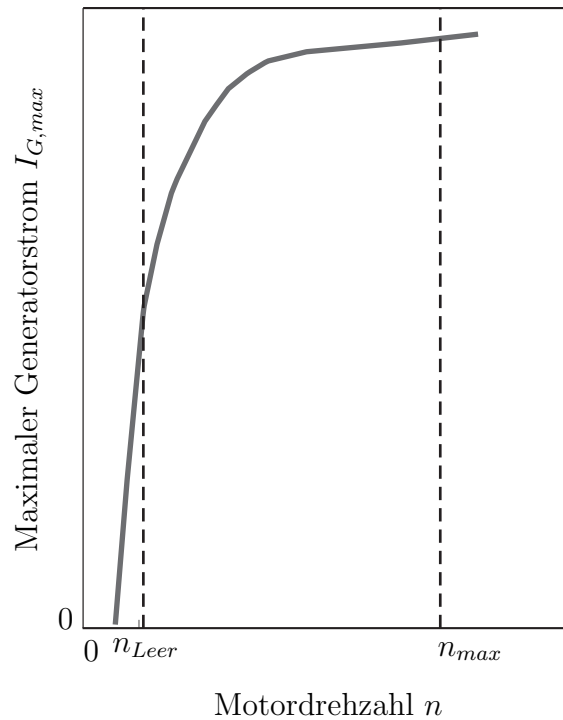


Abbildung 2.2: Qualitativer Verlauf des maximalen Generatorstroms nach BOSCH [84]

Generator- spannung

In konventionellen Bordnetzen wird eine möglichst konstante Spannung benötigt. Durch eine geeignete Generatorregelung kann die Generatorausgangsspannung unabhängig von Drehzahl und Last im Normalfall auf einer nahezu konstanten Spannung von ca. 14 V gehalten werden. Somit wird garantiert, dass Verbraucher, welche gegenüber Spannungsschwankungen empfindlich sind, keinen Schaden nehmen. Es ist technisch natürlich auch möglich, die Generatorspannung gezielt anzuheben oder abzusenken, wenn dies in bestimmten Situationen z. B. für eine witterungsabhängig optimierte Batterieladung zweckdienlich ist [84].

Einfachstes Ener- giemanagement

Im Falle einer Energieknappheit im Bordnetz kann durch eine zeitweilige Anhebung der Generatorspannung die Versorgung aller Komponenten verbessert werden. Diese Regelung der Generatorspannung stellt bereits den ersten Schritt zu einem Energiemanagement (vgl. Kap. 2.4) dar. Für ungeregelte Verbraucher, wie etwa Glühlampen, würde eine solche Spannungsanhebung allerdings zu einer zumindest teilweise ungewollten Erhöhung der Leistungsaufnahme führen und sich unter Umständen auch negativ auf deren Lebensdauer auswirken.

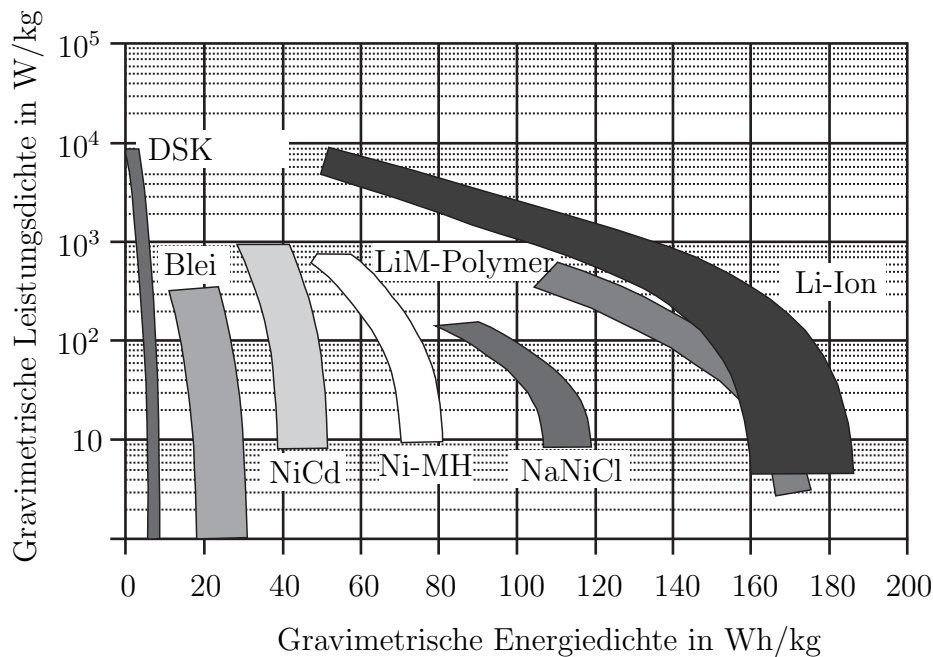


Abbildung 2.3: Leistungsdaten ausgewählter Energiespeicher [102]

2.2.2 Energiespeicher

In modernen Kfz werden aufgrund der aktuellen Entwicklungen sowie der beschriebenen starken Auslastung der Bordnetze hohe Anforderungen an die eingesetzten elektrischen Energiespeicher gestellt. Nach BOSCH (2002 [84]) wird bei Batterien im Kfz zwischen Starterbatterien in klassischen Bordnetzen und Traktionsbatterien für Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge unterschieden. Gerade in den letzten Jahren ist vor dem Hintergrund der Elektromobilität die Bedeutung der Traktionsbatterien stark gestiegen, da immer mehr Fahrzeugmodelle auf diese angewiesen sind. Im Bereich der Batterietechnik ist die Forschungsaktivität im Zuge der Elektromobilitätsforschung, gefördert durch eine Vielzahl staatlicher und privater Programme, stark gestiegen. Neben den momentan viel diskutierten Lithium-Ionen-Batterien bieten aber auch Brennstoffzellen und sogenannte Doppelschichtkondensatoren (DSK) neue Möglichkeiten [6, 7]. Auch wenn die vorliegende Arbeit das klassische Bordnetz (und damit die 12 V Blei-Säure-Batterie) zum Kernthema hat, sollen hier die Entwicklungen neuer Speichertechniken kurz erläutert werden, um eine Grundlage für die Diskussion zukünftiger Entwicklungen zu bieten.

Batterietypen

**Batterie-
kenngrößen**

Die Leistungsfähigkeit elektrischer Energiespeicher kann anhand von zwei Kenngrößen charakterisiert werden. Dabei handelt es sich um die Leistungs- und die Energiedichte. Beide Größen bezogen auf das Gewicht des Energiespeichers ergeben die sogenannten gravimetrischen Größen. Die Leistungsdichte, also die Leistung bezogen auf die Speichergröße, des Speichermediums beschreibt die Größe der Energiemenge, die der Speicher in kurzer Zeit abgeben kann. Die Energiedichte des Mediums ist ein Maß für die Dauer der möglichen Leistungsabgabe. In Abbildung 2.3 werden die Energie- und Leistungsdichten heutiger Speichermedien nach MIT TECHNOLOGY REVIEW (2007/08 [69]) illustriert.

**Auswahl nach
Anwendung**

Je nach Anwendung ist entweder die Leistungs- oder die Energiedichte des Energiespeichers wichtiger. Funktionen, die kurzfristig sehr viel Leistung benötigen bzw. zur Verfügung stellen (z. B. Elektrische Servolenkung) benötigen einen Energiespeicher mit einer hohen Leistungsdichte. Wenn jedoch über längere Zeit relativ wenig Leistung benötigt wird, so ist die Energiedichte entscheidend.

**Speichermedien-
auswahl im
Wandel**

Gerade im Zuge der Elektromobilität aber auch bereits im Hinblick auf moderne Verbraucher im Kfz-Bordnetz wird somit ersichtlich, warum die klassische Blei-Säure-Batterie langfristig alleine nicht ausreichen wird. Insbesondere die Li-Ion-Akkumulatoren stellen im Hinblick auf die Kombination beider Forderungen eine gute Wahl dar. Es werden jedoch auch, wie z. B. bei ÖZBEK ([106], 2010) oder BURKE ([24], 2005), immer wieder die Kombination aus z. B. Doppelschichtkondensatoren mit einer klassischen Batterie verwendet, die in der Gesamtheit auch sehr gute Eigenschaften aufweisen. Gerade die durch den Kondensator reduzierten Leistungsspitzen aus der Batterie lassen eine deutlich erhöhte Batterielebensdauer erwarten.

**Preis
Speichertechnik**

Im Automobilbereich ist neben den technischen Eigenschaften eines Systems der Preis entscheidend. Die Abbildung 2.4 gibt einen Überblick über die Systemkosten verschiedener Speicher. Der dargestellte Vergleich beinhaltet mechanische, elektrische und elektrochemische Energiespeicher. Nach BENDER [14] ist der Vergleich solcher unterschiedlicher Speichermedien nur bedingt sinnvoll, da sie nur sehr selten im direkten Wettbewerb zueinander stehen. Es gibt zwar einige wenige Fahrzeuge, die z. B. Schwungräder einsetzen, wie u. a. in [28] gezeigt, es werden jedoch weiterhin in fast allen Fahrzeugen primär elektrochemische Energiespeicher eingesetzt. Abbildung 2.4 zeigt, dass Wasser und Druckluft eigentlich die optimalen Energiespeichermedien in Bezug auf die Systemkosten und Überbrückungszeit darstellen. Im Kfz können diese Speichertechniken allerdings nicht in geeignetem Umfang eingesetzt werden. Im Vergleich zu den sehr leistungsstarken Li-Ion-Batterien sind die gebräuchlichen Blei-Säure-Batterien die deutlich kostengünstigere und daher im konventionellen Kfz weiter favorisierte Lösung. Neben dem Systempreis der Blei-Säure-Batterie spricht auch die sehr gut beherrschte Technik für deren

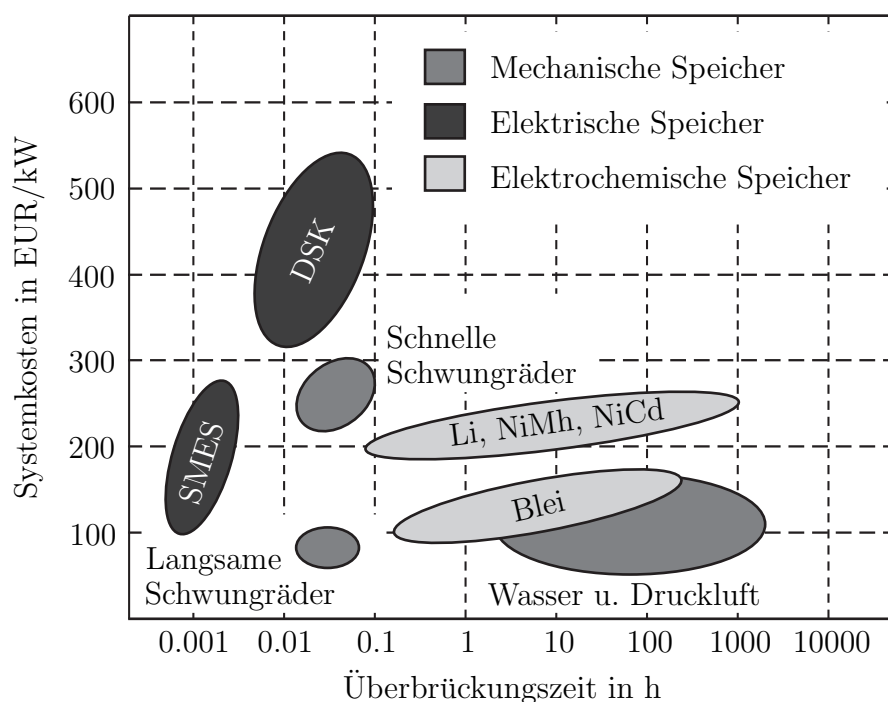


Abbildung 2.4: Systemkosten ausgewählter Energiespeicher [14]

weiteren Einsatz im konventionellen Kfz-Bordnetz. Speichermedien wie z. B. Li-Ion-Akkumulatoren oder Systeme auf Nickel-Basis finden verstärkt Anwendung in Hybrid- oder batterieelektrischen Fahrzeugen. Die Gründe hierfür liegen in den diskutierten Kennwerten der Speichermedien.

2.2.3 Batteriemodelle

Je nach Anwendung werden sehr verschiedene Batteriemodelle verwendet. Diese können von der Modellierung elektrochemischer Prozesse bis hin zu reinen Klemmenspannungsmodellen auf der Basis von Kennfeldern reichen. Ziel eines Batteriemodells zur Untersuchung des Kfz-Bordnetzes (wie es u. a. auch in dieser Arbeit gemacht wird) ist die Beschreibung des elektrischen Verhaltens von Batterien (Klemmenspannungsverlauf). Das Modell ermöglicht es basierend auf den Batterieströmen die Klemmenspannung zu berechnen. Bei der Modellierung der Batterie von besonderer Bedeutung ist der momentane Ladezustand der Batterie (State of Charge *SOC*) sowie das alterungsbedingte Batterieverhalten (State of Health *SOH*). Abbildung 2.5 zeigt das Zusammenwirken dieser Parameter schematisch.

Modellierungsziel

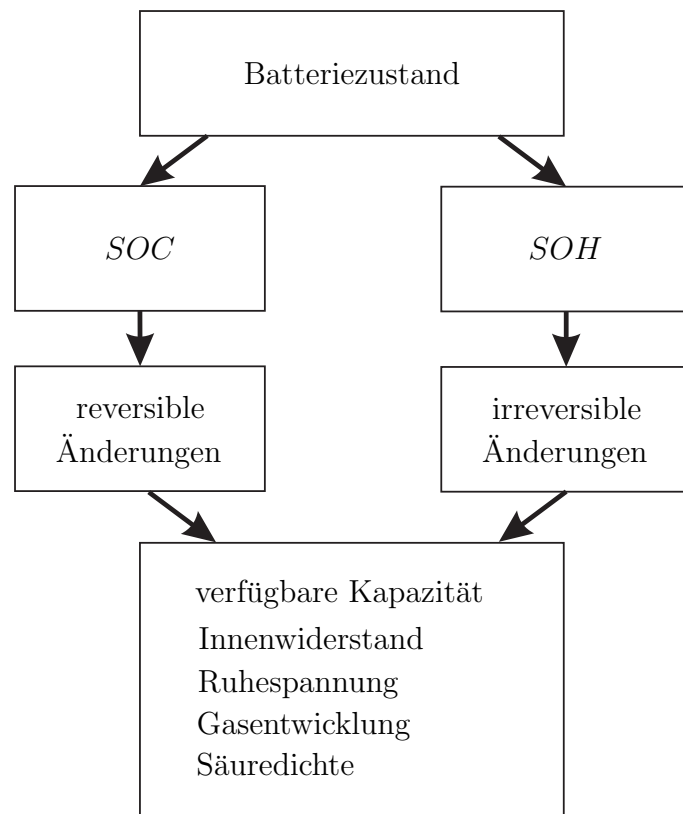


Abbildung 2.5: Beeinflussung der Batterieparameter durch betriebsbedingte Änderungen der Batterie nach HEINEMANN [48]

Große Bandbreite
verfügbarer
Batteriemodelle

Wie bereits erwähnt, ändert sich das Batterieverhalten über die Lebensdauer der Batterie (mit dem Alterungszustand) deutlich. Soll eine reale Batterie abgebildet werden, so müssen die aktuellen Batterieparameter bekannt sein. Die Überwachung und Adaptierung der Parameter auf der Basis des Alterungszustands ist dann von entscheidender Bedeutung. Die Modellierung von Batteriesystemen kann in sehr unterschiedlichen Detailstufen erfolgen. Der Tabelle 2.1 kann ein qualitativer Vergleich verschiedener Batteriemodelle entnommen werden.

Bei der Modellierung und Simulation der Batterie muss darauf geachtet werden, dass der Simulationszweck berücksichtigt wird. Sehr genauer Modelle, die u. U. auch elektrochemische Prozesse berücksichtigen, bedingen meist lange Rechenzeiten. Einfachere Klemmenspannungsmodelle vermeiden dies. Auf die Modellierung der Batterie im Rahmen dieser Arbeit wird in Abschnitt 3.5.3 detailliert eingegangen.

Anhand der Tabelle lassen sich die Vorzüge verschiedener Batteriemodelle erkennen. Für diese Arbeit ist das elektrochemische Verhalten des Speichers nicht von Interesse. Das Batteriemodell muss allerdings gute Ergebnisse für den Verlauf der Klemmenspannung liefern. Diese sollte bei verschiedenen Batterieströmen und Temperaturverläufen (Umweltbedingungen) mit vertretbarem Rechenaufwand ermittelt werden können. Insgesamt erscheint das Modell nach JACKY aus [55] ein sehr guter Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenaufwand zu sein.

Vergleich
verschiedener
Batteriemodelle

	Modellierung nach				
Kriterium	PEUKERT	HOXIE	AIRE- SEARCH	MARTIN	SHEPERD
zeigt Entladeende an	•	•	•	•	•
bildet Spannungsverhalten nach	— — —	— — —	— — —	— — —	•
Elektrische Ersatzschalt.	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —
empirisch ermittelt	•	•	•	•	— — —
elektr.-chem. Hintergrund	— — —	— — —	— — —	— — —	•
Gültig für					
Entladen	•	•	•	•	•
Laden	— — —	— — —	— — —	— — —	•
veränderl. Ströme	— — —	•	○	•	○
Gasung	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —
Selbstentladung	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —
versch. Temperaturen	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —
Pb-Akku	•	•	•	•	•
versch. Speichersysteme	— — —	— — —	— — —	— — —	•

	Modellierung nach				
Kriterium	KLECKNER	HELDT/ CANDERS	RUNGE	GRETSCH	JACKEY
zeigt Entladeende an	•	•	•	•	•
bildet Spannungsverhalten nach	•	•	•	•	•
Elektrische Ersatzschalt.	•	— — —	•	•	•
empirisch ermittelt	•	•	— — —	— — —	•
elektr.-chem. Hintergrund	— — —	— — —	•	•	— — —
Gültig für					
Entladen	•	•	•	•	•
Laden	— — —	— — —	— — —	•	•
veränderl. Ströme	•	•	•	•	•
Gasung	— — —	— — —	— — —	•	— — —
Selbstentladung	— — —	— — —	— — —	•	•
versch. Temperaturen	— — —	— — —	○	•	•
Pb-Akku	•	•	•	•	•
versch. Speichersysteme	•	— — —	— — —	— — —	•

Tabelle 2.1: Qualitativer Vergleich verschiedener Batteriemodelle nach [48] mit Erweiterungen

2.2.4 Verbraucher im Bordnetz

Für die Modellierung des Gesamtbordnetzes von entscheidender Bedeutung sind neben dem Generator und dem Energiespeicher vor allem die verschiedenen Verbraucher und deren Leistungsaufnahme im Betrieb. In diesem Abschnitt wird zunächst auf die benötigte Leistung für eine Vielzahl verschiedener Verbraucher eingegangen, bevor dann die elektrische Servolenkung und das ESC gesondert betrachtet werden.

Leistungsaufnahme
elektr.
Verbraucher

Die Substitution riemengetriebener Aggregate sowie die Einführung weiterer innovativer elektrischer Systeme erfordert einen immer höher werdendes Angebot an elektrischer Leistung im Kfz. Bei den Angaben über den Leistungsbedarf der einzelnen Komponenten wird zwischen Spitzenleistung (P_{max}) und Durchschnittsleistung (P_{ϕ}) unterschieden. Die Durchschnittsleistung eines Verbrauchers kann dabei anhand eines standardisierten Fahrzyklus berechnet werden. Für die modelltechnische Betrachtung der Verbraucher erscheint es allerdings zweckdienlich den Durchschnittsverbrauch der Einzelkomponenten für ihre eigene Einschaltdauer anzugeben. So kann dieser Wert zu einem späteren Zeitpunkt direkt genutzt werden, um das Bordnetz zu belasten. Für einige Verbraucher mit nur einer Schaltstufe sind die Werte der Maximalleistung P_{max} und der Durchschnittsleistung P_{ϕ} dann identisch. In Tabelle 2.4 werden die Leistungswerte einzelner Verbraucher zusammengefasst [34, 44, 48, 84, 93, 94].

Einteilung elektr.
Verbraucher

Grundlegende
Komponenten

Grundlegende Komponenten			
Verbraucher	Quelle	P_{max} in W	P_{ϕ} in W
Starter PKW (Otto-Motor) PKW (Diesel-Motor)	[84]	700..2000	
		1400..2600	
	[48]	2500	2500
Zündung	[84]		20
Elektrische Kraftstoffpumpe	[84]		50..70
	[44]		60
Elektronische Benzineinspritzung	[84]		50..70
	[48]		60
Elektronische Diseleinspritzung	[84]		50..70
Motormanagement	[84]		175..200
	[48]	300	220
	[44]		180
Elektrische Wasserpumpe	[44]	600	200
	[48]	300	300

Grundlegende Komponenten			
Verbraucher	Quelle	P_{max} in W	P_{\emptyset} in W
Glühkerzen (Dieselfahrzeuge)	[84]		je 100
Elektrischer Kühlerventilator	[84]	120	30
Katalysatorheizung	[84]	1000..3000	20..40
	[44]	2000	20..40
	[94]	3000	3000
Standlicht	[84]		7
Scheinwerfer Abblendlicht	[84]	110	je 55
	[34]		90
	[44]		150
Scheinwerfer Fernlicht	[84]		je 60
Zusatzfernscheinwerfer	[84]		je 55
Nebelscheinwerfer	[84]	110	20
	[34]		je 35..55
	[44]		100
Schlussleuchten	[84]		je 5
Bremsleuchten	[84]	42	11
			je 18..21
Zusatzbremsleuchten	[84]		je 21
Rückfahrleuchten	[84]		je 21..25
Nebelschlussleuchte	[84]	21	je 2
	[44]		40
Parkleuchte	[84]		je 3..5
Begrenzungsleuchten	[84]		je 4
Kennzeichenleuchten	[84]		je 10
Blinklichter	[84]	42	5
			je 21
Deckenleuchte (Innenraum)	[84]		5
Instrumentenleuchten	[84]	22	20
Frontscheibenwischer	[34]	50	80..150
	[84]		10
	[44]		80
Heckscheibenwischer	[84]		30..65
Heckscheibenheizung	[34]	200	120
	[84]		60
	[44]		120
Frontscheibenheizung (in den ersten 1..3 min)	[84]	400..1500 bis 2000	100..200

Grundlegende Komponenten			
Verbraucher	Quelle	P_{max} in W	P_{\emptyset} in W
	[48]	1000	500
Hörner und Fanfaren	[84]		25..40
Motorantenne	[84]		60
ABS / TCS / ESC		600	
Elektrohydraulische Servolenkung	[44]	600	70..80
	[48]	1000	1000
Elektrische Servolenkung	[34]	1400	28

Komfort
Komponenten

Komfort Komponenten			
Verbraucher	Quelle	P_{max} in W	P_{\emptyset} in W
Telematik (Radio, TV, ...)	[34]	140..350	
			10..15
	[84]		20
	[44]		60
Telefon	[44]		8
Navigationssystem	[34]		15
Außenspiegelheizung	[34]	56	
Elektrische Spiegelverstellung	[84]		20
Elektrische Fensterheber	[84]		150
Elektrisches Schiebedach	[84]		150..200
Elektrische Sitzverstellung	[84]		100..150
Heizbare Waschdüsen	[44]		40
Wischerablageheizung	[34]	210..270	
Scheiben- und Scheinwerfer- reinigung	[84]	60	50..100
	[44]		14
Gebläse (Lüftung/Klimatisierung)	[84]	460	100..500
	[34]		
	[44]		80
Gebläse (Innenraumheizung)	[84]	120	50
	[48]	500	220
Elektrische Klimaanlage	[34]	3000	1500..2000
		4000	2000
Elektrische Zusatzheizung bei Dieselfahrzeugen	[34]	1700	
	[84]		300..1000
Sitzheizung (je Sitz)	[34]	180	100..200
	[44]		60
	[48]		15

Komfort Komponenten			
Verbraucher	Quelle	P_{max} in W	P_{ϕ} in W
Lenkradheizung	[84]		50
Standheizung	[84]		300..1000
Zigarettenanzünder	[84]		100

Innovative
Hochleistungsver-
braucher

Innovative Hochleistungsverbraucher			
Verbraucher	Quelle	P_{max} in W	P_{ϕ} in W
Force Feedback Lenkrad		600	
Aktive Dämpfung	[48]	3000	3000
Luftfederung	[71]	300	
Aktive Wankstabilisierung		2500	1000
Elektromagnetische Ventil- steuerung	[44]	3400 2000..3000	800..3200 500..750
Elektromechanische Bremse	[34]	1500..2000	1000
	[73]	1000	170
	[44]	2000	200
Brake by Wire	[48]	2000	200

Tabelle 2.4: Verbraucher im Fahrzeugbordnetz

Erhebliche
Schwankungen in
Angaben

Auffällig beim Betrachten der Tabelle ist vor allem, dass es teilweise sehr große Abweichungen zwischen den Angaben der Leistungsdaten aus verschiedenen Quellen gibt. Darüber hinaus ist es mitunter sehr schwierig, verlässliche Daten zu manchen Verbrauchern zu erhalten. Die angegebene Tabelle kann dennoch als guter Überblick über die elektrischen Verbraucher im Kfz angesehen werden. Für eine genaue Analyse der Verbraucher eines spezifischen Fahrzeugs müssen jedoch die genauen Spezifikationen bekannt sein.

Gesamtleistung
nicht verfügbar

Weiterhin zeigt die aufgeführte Liste der Verbraucher deutlich, dass ein heutiger Generator mit einer Nennleistung von 2,5-3 kW nicht die im ungünstigsten Fall geforderte Gesamtleistung liefern kann. Dies macht deutlich, warum Energiemanagementsysteme von entscheidender Bedeutung für ein stabiles Bordnetz sind.

2.3 Fahrdynamikabhängige elektrische Verbraucher

Verbraucher, die von der Fahrsituation abhängige starke Änderungen ihrer Leistungsaufnahmen zeigen und so eine Kopplung von Fahrdynamik und Bordnetz bewirken, sind im weiteren Verlauf dieser Arbeit von besonderem Interesse. Verbraucher, die eine relativ konstant bleibende Leistung aufnehmen, können im Weiteren sehr gut als Grundlast wiedergegeben werden.

Kopplung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden stellvertretend für Verbraucher mit fahrsituationsabhängiger Leistungsaufnahme

- die elektrische Servolenkung (EPS) und
- das ESC

betrachtet. Die EPS hat im Rahmen dieser Arbeit eine übergeordnete Rolle, da sie neben einer Kopplung von Fahrdynamik und Bordnetz zusätzlich den Fahrer in das Gesamtsystem einbringt. Letztlich muss dieser den Lenkwinkel, entsprechend seiner geplanten Bahn, vorgeben und erhält von der EPS lediglich Unterstützung. Das ESC ist ein weiteres Beispiel für ein System, welches Bordnetz und Fahrdynamik koppelt. In diesem Fall bleibt der Fahrer jedoch weitestgehend unbeachtet. Die für eine Fahrzeugstabilisierung nötigen Zeitkonstanten können von einem menschlichen Fahrer nicht umgesetzt werden. Das ESC stabilisiert demnach das Fahrzeug ohne weiteres Zutun des Fahrers. Das ESC eignet sich demnach nicht in dem Maß für Analysen zum gekoppelten Fahrer-Fahrzeug-Systemverhalten (vgl. Kap. 5) wie die EPS.

Kopplung mit
Fahrer

2.3.1 Elektrische Servolenkung

Die elektrische Servolenkung (EPS) substituiert die klassische hydraulische oder auch die elektrohydraulische Servolenkung in immer mehr Fahrzeugen. Während vor einiger Zeit EPS-Systeme nur in Klein- und Mittelklassewagen eingesetzt werden konnten, ist ihre Leistung mittlerweile ausreichend für schwere Fahrzeuge der Oberklasse. Die EPS zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass Leistung nur dann benötigt wird, wenn aktiv gelenkt wird. Ein ständiges Mitlaufen einer Hydraulikpumpe entfällt. Zusätzlich können durch die EPS neuartige Assistenzsysteme, wie etwa das aktive Spurhalten, abgebildet werden [47]. Bevor hier auf die Leistungsaufnahme einer EPS eingegangen wird, sollen zunächst die grundsätzlichen Alternativen in der Bauweise von EPS erläutert werden.

Power on
demand

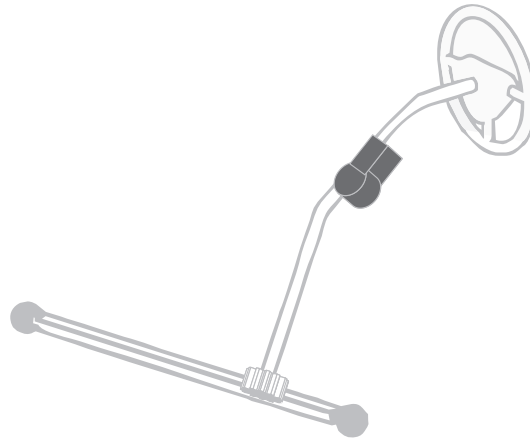


Abbildung 2.6: EPS mit Momenteinleitung an der Lenksäule

Bauweisen

Einteilung EPS

Grundsätzlich sind verschiedene Bauweisen einer EPS verbreitet [8, 47, 81, 85]. Die Bauweisen werden nach dem Einbauort des elektrischen Aktors sowie der Anbindung des Aktors an die Lenkung kategorisiert. Die gebräuchlichen EPS Varianten sind:

- die EPS an der Lenksäule,
- die EPS am Lenkritzel,
- die EPS in Doppelritzelausführung und
- die EPS mit achsparalleler Anordnung von Zahnstange und EPS Aktor.

Lenksäulenantrieb

Beim Lenksäulenantrieb (auch Column Drive) wird die elektrische Servoeinheit (EPS Aktor, Sensorik, Steuergerät, Getriebe) direkt an der Lenksäule angebracht. Dieses Prinzip wird zumeist in kleineren Fahrzeugen verwendet. Der schematische Aufbau dieser Bauweise ist in Abbildung 2.6 zu sehen.

Bei der EPS an der Lenksäule wird die Einheit direkt hinter dem Armaturenbrett verbaut. Das Assistenzmoment wird direkt an der Lenksäule mit dem des Fahrers überlagert und über ein gemeinsames Ritzel an die Zahnstange weitergeleitet.

Gegenüber anderen Bauweisen hat diese Art der Bauweise vor allem Vorteile aufgrund der einfachen Abdichtbarkeit gegenüber Umweltwelteinflüssen sowie der relativ geringen Temperaturbelastung. Dies wird jedoch dadurch erkauft, dass die gesamte Lenksäule für die nun erhöhten Momente ausgelegt werden muss. Darüber hinaus kann die akustische Abschirmung aufgrund der Cockpitnähe zum Problem werden.

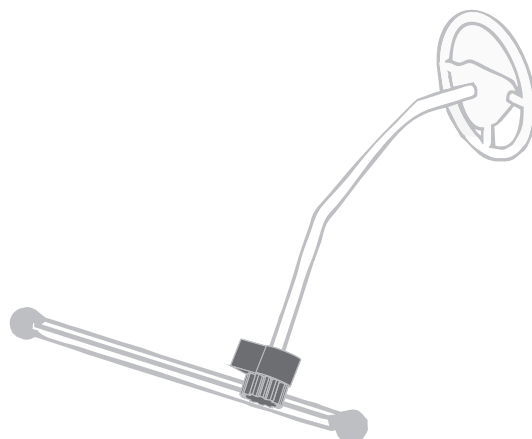


Abbildung 2.7: EPS mit Krafteinleitung am Ritzel

Eine EPS in Ritzelbauweise (Single Pinion Drive) ist in Abbildung 2.7 zu sehen. Diese Bauweise unterscheidet sich von der gerade genannten lediglich durch den Einbauort des EPS-Aktors.

Servoantrieb am
Ritzel

Wie zu sehen ist, wirken wieder das Assistenzmoment sowie das Moment des Fahrers über das Ritzel auf die Zahnstange. Bei der EPS-Ritzel Bauweise ist der EPS-Aktor allerdings direkt am Ritzel verbaut.

Neben der EPS in Ritzelbauweise gibt es die EPS-Variante des Doppelritzels. Diese ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

Doppelritzel

Der Aktor der EPS ist über ein zweites eigenes Ritzel mit der Zahnstange verbunden. Damit kann der Einbauort des Aktors etwas freier gewählt werden als bei der Ritzel-Variante. Es werden hier etwas höhere Unterstützungskräfte ermöglicht als bei den oben gezeigten Bauweisen.

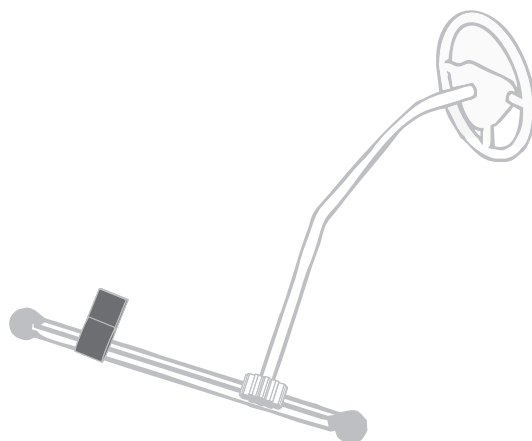


Abbildung 2.8: EPS in Doppelritzelausführung

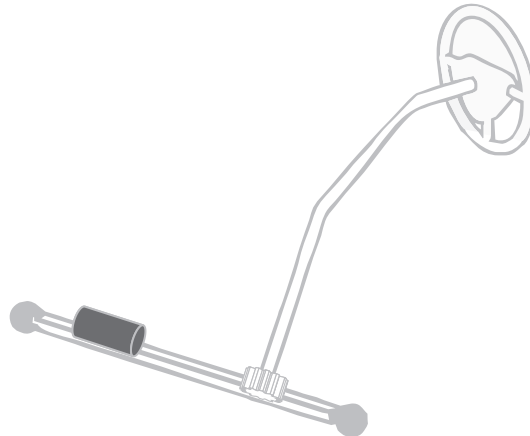


Abbildung 2.9: EPS in achsparalleler Bauweise

Die vierte Variante einer EPS ist die achsparallele Anordnung (vgl. Abb. 2.9).

Achsparallele Anordnung

Die achsparallele Bauweise zeichnet sich durch einen im Vergleich deutlich größeren Aktor gegenüber den vorangegangenen Bauweisen aus. Dieser ist parallel zur Zahnstange montiert und wirkt über einen Kugelgewindetrieb auf die Zahnstange.

Rack Concentric

Als weitere Variante gibt es das Lenksystem vom Typ „Rack Concentric“. Diese unterscheidet sich von der achsparallelen Bauweise dadurch, dass die Drehbewegung von dem EPS-Aktor direkt über einen Kugelgewindetrieb auf die Zahnstange wirkt. Der Elektromotor liegt konzentrisch um die Zahnstange. Dies macht einen Hohlwellenmotor nötig [47].

Vergleich der Bauweisen

EPS-Bauweise nach Fahrzeugtyp

Die verschiedenen Bauweisen einer EPS werden je nach Fahrzeugklasse verwendet. Abbildung 2.10 zeigt diesen Zusammenhang. Aufgrund der hohen Zahnstangenkräfte bei Oberklassefahrzeugen und SUVs kann in solchen Fahrzeugen nur eine EPS in achsparalleler Anordnung eingesetzt werden. Der bei einer solchen EPS verwendete, im Vergleich recht leistungsstarke Motor kann bei Zahnstangenkräften von bis zu 15 kN eingesetzt werden [85]. Dies ist jedoch nicht in allen Fahrsituationen ausreichend, so dass eine weitere Erhöhung der möglichen Assistenzkraft gefordert wird.

Kleinere Fahrzeuge, bei denen lediglich Zahnstangenkräfte von bis zu 10 kN auftreten, können mit einer EPS an der Lenksäule oder in Ritzelbauweise ausgestattet werden.

Zahnstangenkraft		EPS Bauweise				
Fahrzeugklasse	in kN	Lenk- säule	Ritzel	Doppel- ritzel	Achs- parallel	Hydrau- lik
SUV	16				↑	
	15					
Oberklasse	14					
	13					
Obere Mittelklasse	12			↑		
	11	↑	↑			
Mittelklasse	10					
	9					
Kompaktklasse	8					
	7					
Kleinwagen	6					
	6					

Abbildung 2.10: Bauweisen der EPS mit Zuordnung zu Fahrzeugklassen nach RUNGE [85]

Der in einer EPS eingesetzte Aktor ist ein elektromechanischer Wandler. Damit ist klar, dass bei einer Erhöhung der geforderten Assistenzkraft die zu wandelnde elektrische Leistung zunehmen muss. Je nach geforderter Unterstützung der EPS wird das Bordnetz also mit einer Leistung für die EPS belastet. Die mittlere aufgenommenen Leistung für eine EPS beträgt weniger als 10 W. Bereits für Mittelklassefahrzeuge kann es z. B. beim Parkieren zu geforderten Leistungen von bis zu 1 kW kommen [47]. Neben der hohen Maximalleistung sind zudem mögliche große Leistungsgradienten problematisch für das elektrische Bordnetz, da diese dazu führen, dass der Leistungsbedarf zumindest teilweise aus der Batterie gedeckt werden muss [47].

Anforderungen
an das Bordnetz

2.3.2 Fahrdynamikregelsystem (ESC)

Unter den Sammelbegriff Fahrdynamikregelsystem fallen solche Systeme, die aktiv in die Fahrdynamik eingreifen und einen gewünschten Zustand einregeln. Hier soll kurz auf das Regelsystem ESC (Electronic Stability Control) eingegangen werden. Je nach Hersteller sind andere Namen, wie z. B. ESP üblich.

Fahrzeug-
stabilisierung

Das ESC verhindert bei zu dynamischer Fahrt das Auftreten eines zu großen Schwimmwinkels, es verhindert also das Schleudern des Fahrzeugs. Dazu werden gezielt einzelne Räder abgebremst, um so ein Giermoment um die Hochachse des Fahrzeugs zu erzeugen, das dieses dann in die gewünschte Richtung dreht. An dieser Stelle wird nicht näher auf die Funktionsweise der ESC-Systeme eingegangen, da diese bereits vielfach in der Literatur diskutiert werden. Zu nennen ist hier u. a. VAN ZANTEN [105]

Elektro-
hydraulische
Wirkweise

Die ESC-Systeme arbeiten heute mit elektrisch betriebenen Pumpen. Hier wird elektrische Energie in die notwendige mechanische gewandelt. Damit ist das ESC ein gutes Beispiel für ein System, das die Fahrzeugdynamik mit dem elektrischen Bordnetz im Kfz koppelt. Anders als die elektrische Servolenkung wird der Fahrer allerdings nicht als Teil des Systems eingebunden und muss für die weitere Untersuchung des ESC nicht berücksichtigt werden. Die Pumpe des elektrohydraulischen Aggregats benötigt eine Leistung von ca. 600 W.

2.4 Energiemanagement

Energie-
management
notwendig

Mit der Einführung vieler elektrischer Verbraucher in moderne Kfz hat sich die Grundaufgabe der Batterie geändert. Zunächst wurde die Batterie zum Starten des Fahrzeugs benötigt. Mit der Einführung weiterer Verbraucher muss neben dem Starter auch die Leistung für die Ruhestromverbraucher, wie etwa das Radio oder die Alarmanlage von der Batterie geliefert werden, wenn der Verbrennungsmotor (Generator) nicht in Betrieb war. Da dadurch die Batterieladung und damit auch die Batteriespannung unter ein kritisches Maß sinken kann, wodurch u. a. die Startfähigkeit des Fahrzeugs nicht mehr gewährleistet ist, werden Energiemanagementsysteme zum Ruhestrommanagement implementiert. Diese Systeme überwachen den *SOC* der Batterie und stellen dann sukzessive einzelne Verbraucher ab, um die Startfähigkeit des Fahrzeugs weiterhin zu gewährleisten. Nach REIF [80] kann ein solches Energiemanagement im Kraftfahrzeug als Waage betrachtet werden (vgl. Abb. 2.11).

Neue
Anforderungslage
im Bordnetz

Die Anforderungslage an das elektrische Bordnetz hat sich in den letzten Jahren, wie bereits ausführlich diskutiert, dahingehend weiterentwickelt, dass eine große Anzahl verschiedener Verbraucher das Bordnetz bis an die Grenzen auslasten. Die Handhabung des aufgrund der neuen Anforderungslage resultierenden Mehrbedarfs an elektrischer Energie ist heute weiterhin eine große Herausforderung. So kommen z. B. auf die Batterie ganz neue Lastprofile zu. Neben der klassischen Sicherstellung der Startfähigkeit muss die Batterie auch während der Fahrt bei einer negativen Ladebilanz das Bordnetz mit versorgen. Gerade der Leistungsbedarf kurzzeitiger

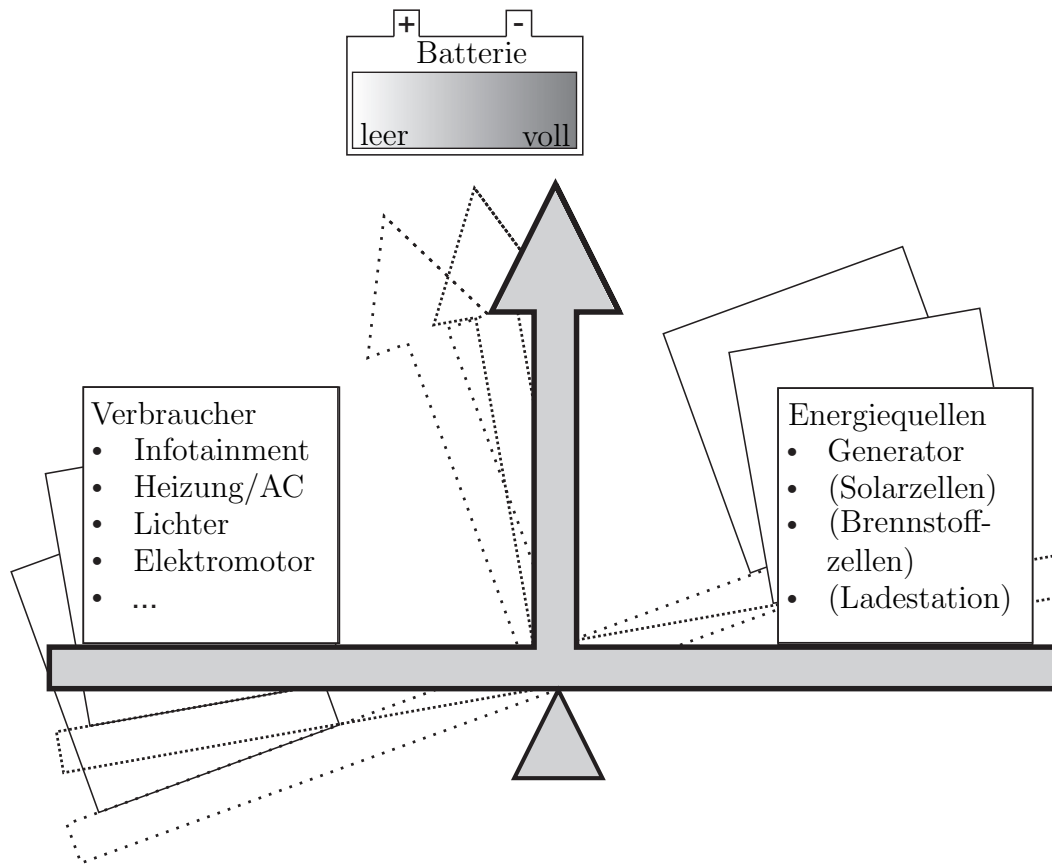


Abbildung 2.11: Grundprinzip eines Energiemanagements nach [80]

Hochstromverbraucher, wie etwa der EPS, führt zu Leistungsspitzen, die beim klassischen Einbatterie-Bordnetz aus der Batterie geliefert werden. So wird die Überwachung der Batterie und ein hiermit gekoppeltes Energiemanagement für zukünftige Fahrzeuge eine entscheidende Aufgabe darstellen [67]. Die vorhandenen Leistungsspitzen verursachen zum einen eine eventuelle Funktionseinbuße wichtiger Komponenten und tragen zum anderen zu einer beschleunigten Batteriealterung bei. Ausgehend von ADAC-Pannenstatistiken [9], zeigt sich nach WALLENTOWITZ [100] die zusätzliche Belastung trotz Optimierung insbesondere an den vermehrt durch die Batterie verursachten Fahrzeugausfällen.

Tabelle 2.5 listet die Grundfälle von Betriebszuständen auf und zeigt wie diese zu einer Entladung führen können. Dabei bezeichnet P_L die Summe der Leistungsaufnahme aller Bordnetzverbraucher und P_G die Gesamtleistung des Generators.

Während eine kurzfristig unausgeglichene Ladebilanz der Batterie nicht unbedingt dazu führt, dass die Startfähigkeit des Fahrzeugs gefährdet wird, sind jedoch die damit verbundenen Absenkungen der Bordnetzspannung von entscheidender Bedeutung. Die Absenkung der Spannung bei einem entstehenden Leistungsdefizit

Zustand Fahrzeug	Zustand Generator	Betriebszustand Batterie	Ladebilanz Bordnetz
Ruhestrom (Diebstahlwarnanlage, Zugangssysteme, ...)	Aus	Entladung, Kapazität entscheidend	$P_L > 0$
Standverbraucher (Radio, Lüfter, ...)	Aus	Entladung, Kapazität entscheidend	$P_L > 0$
Start	Aus	Entladung, Innenwiderstand entscheidend	$P_L > 0$
Leerlauf (nur Kleinverbraucher)	Aktiv	Ladung	$P_L < P_G$
Leerlauf	Aktiv	Entladung	$P_L > P_G$
Fahrt	Aktiv	Ladung	$P_L < P_G$
Fahrt (Hochleistungsverbraucher)	Aktiv	Entladung	$P_L > P_G$

Tabelle 2.5: Grundlegende Zustände des Bordnetzes [80]

kann dazu führen, dass Systeme nicht mehr richtig oder nur noch bedingt funktionieren. Der hiermit verbundene Komfortverlust oder etwaige Sicherheitsprobleme können von Seiten der Hersteller nicht toleriert werden.

Energie-
management von
großem Interesse

Die beobachtete neue Anforderungslage hat dazu geführt, dass verstärkt Wert auf den optimierten Betrieb des Bordnetzes gelegt wird. Dieser neue Anspruch spiegelt sich in der Vielzahl von Veröffentlichungen zu dieser Thematik wider. KESSELS [58, 59] SCHMIDT [88], CIERULLIES [27], FABIS [34], BÜCHNER [13] oder auch HEINTEL [49] sind nur einige Beispiele hierfür. Zudem wird im Zuge der Elektromobilität verstärkt die Notwendigkeit eines Energiemanagementsystems auch für das Traktionsbordnetz diskutiert (vgl. Anhang A.2).

Schnelles Bord-
netzmanagement
notwendig

Während in der Vergangenheit oft der Fokus auf Bordnetzmanagementsystemen zum Ausgleich einer längerfristigen Ladebilanz oder der Optimierung über einen Fahrzyklus lag, muss mit der zunehmenden Zahl elektrischer Hochleistungsverbraucher verstärkt Wert auf ein schnelles Bordnetzmanagement zum Sicherstellen der momentan benötigten Leistung gelegt werden.

Anforderungen
Energiemanage-
ment

Moderne Energiemanagementsysteme müssen neben den klassischen Anforderungen auch Forderungen³ aufgrund der geänderten Betriebszustände im Bordnetz genügen. Diese sind:

³Die aus der Literatur entnommenen Forderungen stellen hier keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

- Sicherstellen eines ausreichenden Batterieladezustandes [89] und somit Gewährleisten der Startfähigkeit [89, 100],
- Verbesserung der Energieversorgung [89],
- Stabilisierung der Bordnetzspannung [89, 100],
- Optimierung der Ladestrategie zur Erhöhung der Batterielebensdauer [87, 100],
- Vermeiden von Komforteinbußen durch Erhöhung der Systemverfügbarkeit [87],
- Optimierung der Erzeugung, Speicherung und Nutzung elektrischer Energie zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs [100],
- ständige Verfügbarkeit sicherheitsrelevanter Funktionen (z. B. EPS) [87],
- Beherrschung von Lastwechseln sowie das Vermeiden von Überlastfällen [13, 100] sowie
- Reduzierung/Vermeiden der Wahrnehmbarkeit von Änderungen im Bordnetz seitens des Fahrers/Insassen eines Kfz [89].

Soll ein Energiemanagementsystem allen diesen Anforderungen genügen, so muss in das gesamte Bordnetz eingegriffen werden können. Dabei können entsprechend dem Grundaufbau eines Bordnetzes nach WALLENTOWITZ [100] die drei Teilbereiche

Teilbereiche Energiemanagement

- Erzeugermanagement,
- Speichermanagement und
- Verbrauchermanagement

unterschieden werden. Im Folgenden wird kurz auf diese Teilbereiche eingegangen.

2.4.1 Erzeugermanagement

Heutige Kfz-Bordnetze verfügen meist über einen Energieerzeuger. Dies ist wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben der Generator. Die Generatorleistung entspricht damit direkt der in das Bordnetz eingespeisten Leistung. Um die gewünschte konstante Bordnetzspannung zu gewährleisten, ist daher unbedingt notwendig den Generator geregelt zu betreiben. Bei der Regelung des Generators muss hinterfragt werden [100],

- welche Leistung von den Verbrauchern im Bordnetz gefordert wird und

- welche möglichen Rückwirkungen die Regelung des Generators auf den Antriebsstrang hat?

Konstanthaltung der Generatorspannung	Die heutige Standardregelung eines Generators hat die Aufgabe die Generatorspannung möglichst konstant auf ca. 14 V zu halten. Die Spannungsvorgabe kann allerdings auch witterungsabhängig geändert werden, wenn dies z. B. für die Batterieladung notwendig wird.
Load-Response-Zeit	Da plötzliche Lastwechsel des Generators durch das damit veränderliche Generatormoment ungewollte Rückwirkungen auf den Antriebsstrang haben, wird die Erregerspannung des Generators meist rampenförmig geändert. So können Drehzahlschwankungen vermieden werden. Hierdurch kommt es zwischen der Leistungsforderung eines Verbrauchers und der Bereitstellung dieser Mehrleistung durch den Generator allerdings zu einer zeitlichen Verzögerung. Diese Zeitverzögerung wird Load-Response-Zeit genannt und muss in einem Energiemanagementsystem beachtet werden. Während der Load-Response-Zeit muss die fehlende Leistung von der Batterie geliefert werden (vgl. SCHÖLLMANN [87]). Dieses Erzeugermanagement eignet sich demnach nicht dazu, kurzfristige hohe Lastspitzen abzufangen.
Leerlaufdrehzahl	In Leerlaufphasen des Verbrennungsmotors ist es möglich die Leerlaufdrehzahl zu verändern. Eine erhöhte Leerlaufdrehzahl hat den Effekt, dass der Generator mehr Leistung abgeben kann. Durch diese Maßnahme kann daher die Ladebilanz der Batterie positiv beeinflusst werden [87]. Für die Versorgung von Systemen wie der EPS ist die Leerlaufdrehzahlanhebung irrelevant, sie trägt jedoch dazu bei, eine insgesamt positive Ladebilanz zu gewährleisten.

2.4.2 Speichermanagement

Speichermanagement gegen Tiefentladung	Wie schon im Kapitel 1 beschrieben reicht das Leistungsangebot des Generators in verschiedenen Situationen nicht für den Betrieb des Bordnetzes aus. Kommt es zu einem Leistungsengpass, so muss die Batterie als weiterer Energielieferant auftreten. Die Batterie wird in solchen Situationen entladen. Da immer häufiger Situationen oder Fahrzyklen auftreten in denen die Batterie als Energielieferant benötigt wird, ist die Überwachung der Batteriegrößen (<i>SOC</i> , <i>SOH</i>) eine wichtige Aufgabe. Nur mit deren Kenntnis kann eine genügende Batterieladung gewährleistet sein.
Sensierung der Batterie	Sensoren wie etwa der intelligente Batteriesensor der Firma BMW (vgl. SCHÖLLMANN [87]) liefern die nötigen Größen der Batterie (<i>SOC</i> , <i>SOH</i>). Da die Batterie im konventionellen Kfz-Bordnetz allerdings eine passive Komponente ist, wird ein

übergeordnetes Energiemanagement benötigt, das im Falle einer zu niedrigen Batterieladung durch Lastabwurf oder Erhöhung der Generatorleistung eine verbesserte Batterieladung ermöglichen kann.

2.4.3 Verbrauchermanagement

Die Grundidee eines Verbrauchermanagements ist sehr einfach und besteht darin, rechtzeitig einzelne Verbraucher abzuschalten oder in ihrer Leistungsaufnahme zu drosseln, um die Funktion anderer Verbraucher oder das Laden der Batterie zu gewährleisten. Diese zunächst sehr einfache Idee funktioniert nur unter zwei Bedingungen:

Grundidee
Verbrauchermanagement

- Den Verbrauchern muss eine Wertigkeit zugeordnet werden, anhand welcher zu entscheiden ist, welcher Verbraucher funktionsfähig bleiben muss und welcher abgeschaltet werden darf.
- Ein Leistungsdefizit muss rechtzeitig erkannt werden, so dass geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden können.

Die Einordnung der Verbraucher entsprechend einer Wertigkeit ist relativ einfach. Sie bedarf jedoch einer Abstimmung an das jeweilige Fahrzeug und auch an den vom Hersteller gewünschten Kundennutzen und erfordert dadurch detaillierte Kenntnis der Zusammenhänge im Bordnetz. Der zweite Punkt hingegen ist nicht trivial zu erfüllen. Die Prädiktion der Leistung einzelner Verbraucher gestaltet sich als sehr schwierig. Dies macht eine frühzeitige Detektion eines ungewollten Bordnetzzustands sehr schwierig.

In der Literatur werden verschiedene Ansätze zum Energiemanagement diskutiert. Dabei treten sehr große Gemeinsamkeiten aller Managementsysteme auf. Drei Managementansätze für das elektrische Leistungsbordnetz werden hier in komprimierter Form beschrieben.

Verbrauchermanagement mit Prioritätenlisten

Das Verbrauchermanagement mit Hilfe einer Prioritätenliste basiert darauf, die Verbraucher entsprechend der Funktion (Relevanz für das Gesamtsystem) zu priorisieren. Dies entspricht direkt der Forderung den Verbrauchern eine Wertigkeit zuzuordnen. Die Verbraucher können so in Gruppen gleicher Wichtigkeit eingeteilt werden. Tabelle 2.6 gibt hierzu einige Beispiele.

Priorisierung von Verbrauchern	
Verbraucher	Priorität
Starter	1
Zündung	1
Elektrische Kraftstoffpumpe	1
Elektronische Benzineinspritzung	1
Motormanagement	1
elektrische Servolenkung	2
Scheibenwischer	4
Fernlicht	4
Heckscheibenheizung	9
elektrische Klimaanlage	9
Wischerablageheizung	10

Tabelle 2.6: Beispiel einiger Verbraucher im Fahrzeugbordnetz mit zugeordneter Priorität von 1=wichtig bis 10=unwichtig

Priorisierung ist herstellerspezifisch

Bei der Erstellung einer solchen Prioritätenliste muss stets zwischen einer technischen Funktion (z. B. sicherheitsrelevanter Verbraucher) und einem direkten Kundennutzen (z. B. aus Komfortsystemen) abgewogen werden. Eine abschließende Priorisierung der Verbraucher kann somit nur für ein spezielles Fahrzeug und in Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Hersteller erfolgen. Die hier gezeigte Liste kann demnach nicht als allgemeingültig angesehen werden.

Managementstrategie

Die Grundidee des Energiemanagements ist danach jedoch sehr einfach. Wenn genügend elektrische Leistung zur Verfügung steht ($P_L < P_G + P_B = P_{max}$), so werden alle angeschalteten Verbraucher versorgt. Tritt ein Engpass auf ($P_L > P_{max}$), so werden einzelne Verbrauchergruppen, angefangen mit der niedrigsten Priorität, abgestellt. Dabei ist natürlich die Kenntnis der maximal entnehmbaren Leistung aus Batterie und Generator von entscheidender Bedeutung. Die Maximalleistung, die für die Batterie zugelassen wird, kann vom Energiemanagement so gewählt werden, dass diese immer ausreichend geladen ist. Dies soll die Funktion der wichtigsten Verbraucher möglichst lange aufrecht erhalten und einer zu starken Entladung der Batterie entgegenwirken.

Zu grobe Diskretisierung

Die sehr einfache zentrale Methode des Energiemanagements nach Prioritätenliste ist vor allem gut geeignet um Ruhestromverbraucher zu managen. Vor allem die Startfähigkeit nach langen Standphasen kann somit garantiert werden, da sukzessive Verbraucher abgeschaltet werden, während sich die Batterie entlädt. Kurzzeitige, schnelle Lastwechsel im Bordnetz während des Betriebs, wie sie z. B. durch eine elektrische Servolenkung ausgelöst werden, können allerdings nur bedingt abgefan-

Klasse	Beschreibung
Klasse 0	Enthält die maximale Abgabeleistung aller Erzeuger und Speicher
Klasse 1	Enthält alle Verbraucher ohne Signalanbindung und sämtliche Modellfehler
Klasse 2	Enthält alle nicht beeinflussbaren - z. B. sicherheitsrelevanten - Verbraucher und dient der schnelleren Bilanzierung
Klasse 3	Enthält alle nicht-sicherheitsrelevanten, aber im Degradationsfall deutlich wahrnehmbaren Verbraucher
Klasse 4	Enthält alle nicht-sicherheitsrelevanten, aber im Degradationsfall wenig wahrnehmbaren Verbraucher
Klasse 5	Enthält alle nicht-sicherheitsrelevanten, aber im Degradationsfall nicht wahrnehmbaren Verbraucher
Klasse 6	Enthält alle Verbraucher, die unbemerkt zugeschaltet werden können und ein anschließendes Einsparpotential bieten (z. B. 3. Stufe einer Sitzheizung, wenn Stufe 2 verlangt wird, damit die Sitzheizung anschließend eine gewisse Zeit abgeschaltet werden kann)
Klasse 7	Enthält alle Verbraucher, die unbemerkt eingeschaltet werden können, aber anschließendes kein Einsparpotential bieten (z. B. Heckscheibenheizung im Sommer). Diese Klasse ist nur in bestimmten Fehlerfällen relevant

Tabelle 2.7: Beispielhafte Klasseneinteilung des Prioritätenansatzes nach SCHMIDT [89]

gen werden. Da jeweils komplette Gruppen von Verbrauchern mit gleicher Priorität abgeschaltet werden, kommt es im Bordnetz zu relativ großen Lastsprüngen. Diese können zu ungewollten Oszillationen führen, was sich im Rahmen dieser Arbeit anhand von Simulationen sehr deutlich gezeigt hat.

Eine deutliche Weiterentwicklung des Energiemanagements auf der Basis von Prioritätslisten wird von SCHMIDT in [88, 89] vorgestellt. SCHMIDT bewertet die einzelnen Verbraucher danach, ob sie vom Kunden wahrnehmbar sind, oder nicht. Es wird also direkt der Kundennutzen als Maß für die Priorisierung verwendet. Je nach Wahrnehmbarkeit der Verbraucher können diese in die Klassen entsprechend Tabelle 2.7 eingeordnet werden [97].

Feinere
Diskretisierung

Innerhalb der Klassen werden zudem zehn Prioritätsstufen unterschieden. Damit wird die Möglichkeit einen Verbraucher einzuordnen deutlich verfeinert. Es ergibt sich eine Matrix mit den Klassen als Zeilen sowie den Prioritäten als Spalten [97].

Weiterhin geht SCHMIDT davon aus, dass die Priorisierung eines Verbrauchers zustandsbedingt veränderlich ist, was die Möglichkeit einer variablen Nutzenzu-

Dynamische
Priorisierung

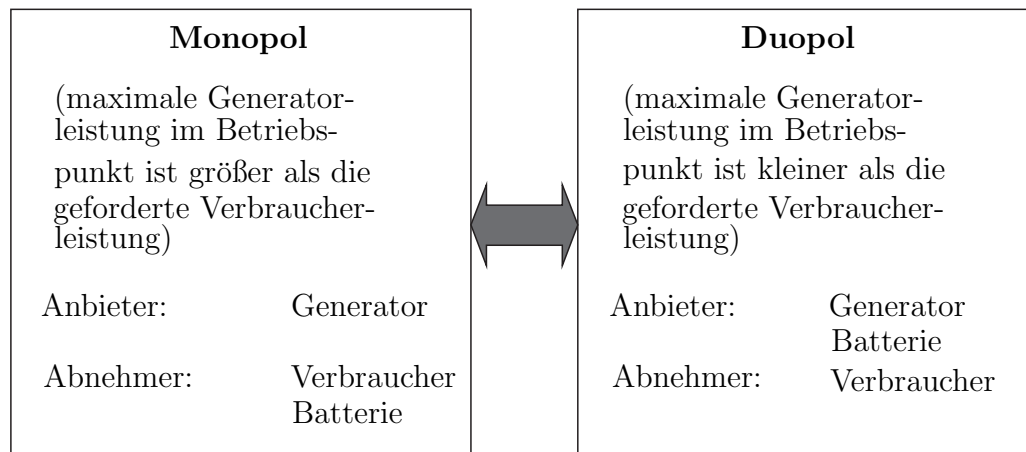


Abbildung 2.12: Das Energiebordnetz im Kraftfahrzeug als Energiemarkt [87]

weisung zu einem Verbraucher bedeutet. Der Nutzen eines Verbrauchers (Priorität) bleibt allerdings weiterhin diskret. Eine zumindest für einige Verbraucher auch denkbare kontinuierliche Regelung wird bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt [97].

Verbrauchermanagement auf Basis ökonomischer Modelle

Bordnetz als
Energiemarkt

Ein knappes Gut auf verschiedene Interessenten zu verteilen legt die Idee nahe ökonomische Modelle hierfür zu verwenden. Nach GRAF [42], SCHÖLLMANN [87] oder auch BÜCHNER [13] kann das Bordnetz eine Kfz mit den vielen Verbrauchern und der begrenzten elektrischen Energie als ein Energiemarkt gesehen werden. Die Parallelen zwischen der Allokation elektrischer Energie im Bordnetz und der einer Ware entsprechend ökonomischer Modelle ermöglicht nach BÜCHNER [13] verschiedene Marktmodelle oder auf die Verteilung der elektrischen Energie im Bordnetz anzuwenden. Er wendet die Prinzipien der Ökonomie dazu an, die Erzeugung und die Allokation der Energie im Kfz-Bordnetz mit Hinblick auf die Energieeffizienz zu optimieren. Abhängig vom vorherrschenden Betriebszustand des Bordnetzes muss zwischen verschiedenen Marktformen unterschieden werden. Diese sind in Abbildung 2.12 dargestellt.

Marktformen

Im Optimalfall, d. h. wenn die maximale Generatorleistung zu einem Zeitpunkt größer ist als die Summe der Verbraucherleistungen, entspricht der Energiemarkt (das Bordnetz) einem Monopol⁴. Der Generator liefert die gesamte geforderte Leistung und ist damit aufgrund der Bordnetztopologie einziger Anbieter der Ware

⁴Nach BÜCHNER [13] liegt auch dann ein Monopol vor, wenn der Verbrennungsmotor des Fahrzeugs aus ist. In diesem Fall muss natürlich die Batterie als einziger Energielieferant auftreten. Im Rahmen dieser Arbeit ist dieser Betriebspunkt allerdings nicht von Interesse.

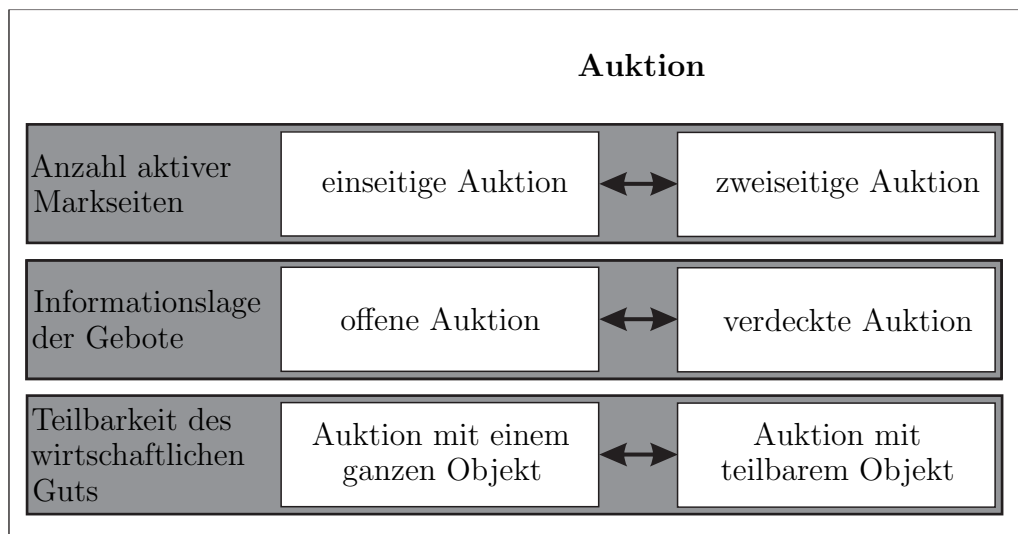


Abbildung 2.13: Wesentliche Eigenschaften zur Einteilung von Auktionsarten [13]

Energie. Die Vielzahl der aktiven Verbraucher stellen die Abnehmer dieser Ware dar. Liefert der Generator genügend Leistung, so tritt auch die Batterie (der Energiespeicher) als Abnehmer in den Energiemarkt ein. Ihn wird der vorhandene Energieüberschuss zugeteilt. Reicht die Generatorleistung nicht aus, um alle Verbraucher zu versorgen, so muss die Batterie, wie schon mehrfach erwähnt, die Differenzleistung erbringen. Damit stellt sich der Energiemarkt als Duopol dar. Es gibt nun zwei Energielieferanten, die die Verbraucher versorgen.

Strebt der Anbieter (die Anbieter) der Ware Energie nach einer Gewinnmaximierung, so eignet sich nach SCHÖLLMANN [87] das ökonomische Modell nicht zum Energiemanagement in einem Kfz-Bordnetz. Es würde zu einer ständigen Unterversorgung der Verbraucher kommen, da diese zu einem erhöhten Gewinn führen würde. Der Generator erzeugt dann immer etwas weniger Energie als benötigt würde. Wird allerdings dem Marktgleichgewicht oberste Priorität eingeräumt, dann kann laut BÜCHNER [13] die bestmögliche Versorgung aller Verbraucher gewährleistet werden. Die Anbieter versuchen dann zu jedem Zeitpunkt die komplette Nachfrage aller Verbraucher zu befriedigen.

Marktgleichgewicht muss Ziel sein

Ein solches Marktmodell hat nach BÜCHNER starke Ähnlichkeit mit den Mechanismen einer einseitigen Auktion. Er wendet in [13] ein Auktionsmodell zur Allokation der elektrischen Energie an und legt dar, welche Vorteile das Auktionsmodell gegenüber dem zuvor beschriebenen Energiemarkt besitzt. Es können verschiedene Auktionsmodelle zum Einsatz kommen. Sie lassen sich grundsätzlich nach den in Abbildung 2.13 aufgeführten Eigenschaften unterscheiden.

Allokation über Auktion

Auktionsformen

Nach BÜCHNER [13] gibt es die folgenden wichtigen Eigenschaften von Auktionen:

- die Anzahl der aktiven Marktseiten,
- die Informationslage der Gebote während des Auktionsablaufes und
- die Art des Auktionsobjektes.

Preisbereitschaft
der Verbraucher

Das Energiemanagement im Kfz-Bordnetz kann als eine einseitige, offene Auktion mit dem teilbaren Objekt „zur Verfügung stehende Energie“ verstanden werden. BÜCHNER [13] geht davon aus, dass die Priorität bzw. Funktionsrelevanz der Verbraucher durch deren Bietstrategie berücksichtigt werden kann. Die Wahrnehmbarkeit sowie Akzeptanz des Kunden bei einer entsprechenden Funktionsstörung eines Verbrauchers muss laut GAEDT [40] zusätzlich als wichtiges Kriterium für den Nutzen eines Verbrauchers herangezogen werden. Entsprechend der geforderten Wertigkeit der einzelnen Verbraucher kann nun der Maximalpreis, den der Verbraucher pro Energieeinheit bezahlen kann, festgelegt werden. Dies führt zu einer Sortierung der Verbraucher nach Relevanz für das Gesamtsystem. Durch das Propagieren des aktuellen Preises können Verbraucher dann auch dezentral geschaltet werden. Damit hat das Modell einer einseitigen Auktion durchaus Parallelen zu dem zuvor gezeigten Prinzip der Prioritätenlisten [97].

Agentenorientiertes dezentrales Energie- und Funktionsmanagement

Dezentralisierung
Energie-
management

Aufgrund der großen Bedeutung der Energiemanagementsysteme im Kfz für die sichere Funktion verschiedener Komponenten, ist es wünschenswert eine dezentrale Struktur zu wählen. Ein einzelnes Steuergerät, das für das Energiemanagement zuständig ist, bildet nach HEINTEL [49] einen Single Point of Failure. Kommt es zu einem Defekt in diesem Steuergerät fällt dadurch das gesamte Energiemanagement aus. Die Sicherheitsanforderungen, die an ein System wie das Bordnetzmanagement gestellt werden, würden daher eine Redundanz fordern, die natürlich einen erhöhten technischen und finanziellen Aufwand bedeuten würde.

HEINTEL geht in [49] daher dem Ansatz nach ein dezentrales Energiemanagementsystem mit hohem Maß an Flexibilität und Erweiterbarkeit aufzubauen. Dieses Konzept ist ein agentenorientiertes Konzept in dem die Verbraucher als teilautonome Agenten das Energiemanagement selber durchführen. Das so entstehende

verbraucherseitige Managementsystem ist aufgrund der auf die Verbraucher verteilten Algorithmen sehr fehlertolerant [49].

Zielsetzung ist es einen sogenannten konsistenten Systemzustand sicherzustellen. Dieses grundsätzliche Ziel ist nach HEINTEL [49] erreicht, wenn Versorgungssicherheit und Fairness besteht und das Bordnetz frei von Defekten ist. Die Versorgungssicherheit ist gegeben, wenn die maximale Leistung des Generators und der Batterie soweit über der Leistungsnachfrage der Verbraucher liegt, dass eine Leistungsreserve besteht. Die Fairness der Energieverteilung in einem Bordnetz lässt sich nach HEINTEL über die Priorität der Verbraucher definieren. Fairness ist gewährleistet, wenn zwei Punkte erfüllt sind. Zunächst darf bei einem ausreichenden Leistungsangebot kein Verbraucher deaktiviert sein. Zudem müssen hochprioritäre Verbraucher vorrangig versorgt werden. Es darf also kein niederprioritärer Verbraucher zu Lasten eines höher priorien Verbrauchers aktiviert sein. Die zweite Forderung hat allerdings nur dann Bestand, wenn durch die Deaktivierung der niederprioritären Verbraucher genügend Leistung frei würde, um den hochprioritären Verbraucher zu betreiben. Das letzte Teilziel ist die geeignete Behandlung von auftretenden Defekten. Der Bordnetzzustand ist konsistent, wenn alle Teilziele erreicht werden. Weiterführende Erläuterungen zum Konzept des agentenorientierten, dezentralen Energie- und Funktionsmanagements sind HEINTEL [49] zu entnehmen.

Versorgungs-
sicherheit

Fairness

Behandlung von
Defekten

Zusammenhänge der aufgeführten Energiemanagementsysteme

Die vorangegangenen Abschnitte haben verschiedene Ansätze für eine optimierte Leistungsverteilung im elektrischen Bordnetz gezeigt. Auch wenn hier teilweise verschiedene Begrifflichkeiten und auch unterschiedliche Herangehensweisen verwendet werden, so ist es doch so, dass dem EEM jeweils eine Festlegung der Wertigkeit eines jeden Verbrauchers vorausgeht. Diese Wertigkeit kann statisch oder entsprechend verschiedener Einflussfaktoren dynamisch gewählt werden.

Verbraucher-
bewertung
notwendig

Worin sich die Bordnetzmanagementsysteme unterscheiden, ist die übergeordnete Struktur. So gibt es zentrale Systeme, welche darauf basieren, dass eine Stelle alle Informationen sammelt und dann gezielt auf einige Verbraucher Einfluss nimmt und dezentrale Systeme, welche den einzelnen Verbrauchern sofortiges (teilautonomes) Handeln zugestehen.

Zentrale und
dezentrale
Systeme

KAPITEL 3

Abbilden des Gesamtsystems

In diesem Kapitel wird das Gesamtsystem bestehend aus Fahrzeug(-dynamik) und Bordnetz modelltechnisch abgebildet. Dabei ist vor allem die Kopplung zwischen diesen beiden Teilbereichen von entscheidender Bedeutung für diese Arbeit. Weiterhin werden Algorithmen zum Energiemanagement vorgestellt. Damit bildet das folgende Kapitel die Grundlage für alle im Rahmen der Arbeit durchgeführten Simulationen.

3.1 Gesamtstruktur

Die Modellstruktur des Gesamtsystems wird in Abbildung 3.1 gezeigt. Sie kann in zwei Hauptteile mit den dazugehörigen Untermodellen sowie deren Kopplung gegliedert werden. Simulationsstruktur

- Mechanik
 - Fahrzeugmodell
 - Reifenmodell
 - Lenkungsmodell
 - Antriebsstrang

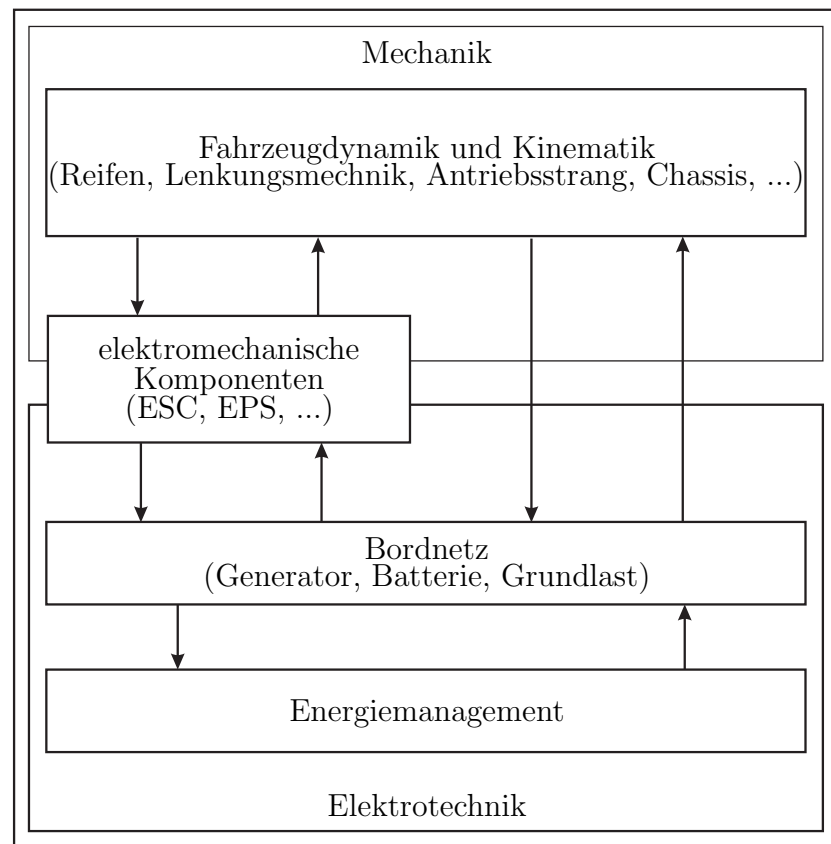


Abbildung 3.1: Verwendete Modellstruktur

- Elektromechanische Kopplung (elektrische Aktoren)
 - ESC
 - EPS
 - etc.
- Elektrotechnik
 - Bordnetzmodell mit Generator, Batterie und Grundlast
 - Energiemanagement

Erweiterung um
elektromech.
Komponenten
möglich

Die gezeigte Struktur kann jederzeit um weitere elektromechanische Komponenten wie z. B. ein aktives Fahrwerk ergänzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die EPS als beispielhafte elektromechanische Komponente hervorgehoben, da diese sich zusätzlich eignet, um den Fahrer in den Gesamtkontext einzubinden. In den folgenden Abschnitten werden nun die einzelnen Modellkomponenten näher betrachtet, um so das zu untersuchende Gesamtsystem abzubilden.

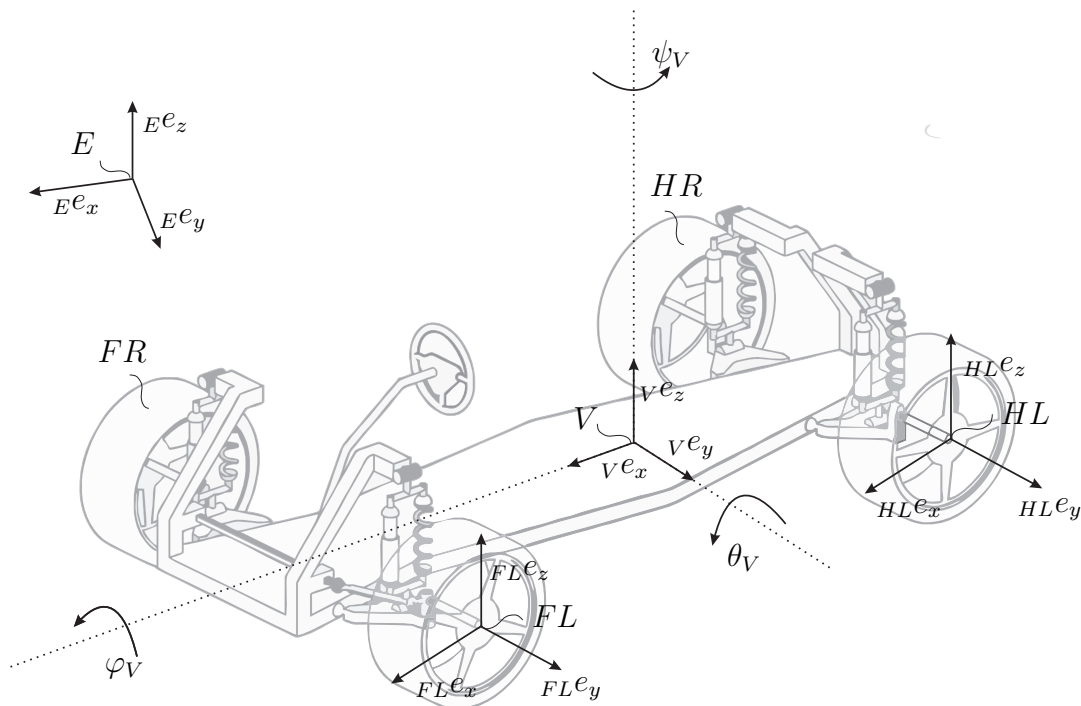


Abbildung 3.2: Fahrzeugbewegung im Raum

3.2 Fahrzeugbewegung

Die Beschreibung der Fahrzeugbewegung im Raum ist nach der DIN 70000 [2] eindeutig festgelegt. Die Abbildung 3.2 zeigt die zu verwendenden Größen und Bezugssysteme.

Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung mit diesen Größen gibt es verschiedene Standardwerke und Dissertationen. Zu nennen sind unter anderen SCHRAMM (2010, [90]) oder MITSCHKE (2003, [70]). Im Rahmen dieser Arbeit kann auf am Lehrstuhl für Mechatronik bestehende Fahrzeugmodelle zurückgegriffen werden. Diese sind zum Großteil in SCHRAMM (2010, [90]) oder auch UNTERREINER (2011, [99]) zu finden. Die verwendeten Fahrzeugmodelle sind durchgehend auf dem Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen (vgl. Kap. 5) implementiert. Dies erlaubt neben der Offline-Simulation auch Analysen, die eine Echtzeitsimulation erfordern. An dieser Stelle wird lediglich auf die hier besonders interessante Zahnstangenkraft und die damit verbundenen Reifenkräfte näher eingegangen.

Bestehende
Echtzeitmodelle

funden werden. Zu nennen sind das HSRI-Reifenmodell in DUGOFF [32] oder das „Magic Formula“ Modell nach PACEJKA [74].

Die Modellierung der Reifenquerkräfte wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nach PACEJKA vorgenommen. Das sogenannte „Magic Formula“ Modell ist eine rein mathematische Beschreibung des Ein-/Ausgangsverhaltes eines Reifens. Das Modell erlaubt es, den Starrkörperschlupf der Reifen mit den Kraftgrößen zu verknüpfen [90]:

„Magic Formula“
Modell

- Umfangskraft F_x^{Latsch} mit dem Umfangsschlupf s ,
- Querkraft F_y^{Latsch} mit dem Schräglaufwinkel α und
- das Rückstellmoment T_z^{Latsch} mit dem Schräglaufwinkel α .

Die zu beschreibenden Zusammenhänge können durch Roll- und Fahrversuche ermittelt werden. Die mathematische Beschreibung des gemessenen Übertragungsverhaltens ist durch

$$\begin{aligned} y(x) &= D \sin \{C \arctan [Bx - E(Bx - \arctan Bx)]\}, \\ Y(X) &= y(x) + s_v \text{ und} \\ x &= X + s_h. \end{aligned} \tag{3.1}$$

$Y(X)$	Umfangskraft F_x^{Latsch} , Querkraft F_y^{Latsch} oder Rückstellmoment T_z^{Latsch}
X	Längsschlupf s oder Schräglaufwinkel α
C	Formfaktor - Strecken in x -Richtung
D	maximale Kraft $F_{x,y,max}$ bzw. maximales Moment $T_{z,max}$
E	Formfaktor - Dehnung oder Kompression der Kennlinien
BCD	Steigung der Kennlinien bei Nullschlupf (für Querkraft Schräglaufsteifigkeit)
s_v	Vertikalverschiebung der Kennlinien
s_h	Horizontalverschiebung der Kennlinien

gegeben [90]. Die Ergebnisse der Messungen erlauben dann eine Anpassung einer generellen Reifenkraftkennlinie an die wahren Gegebenheiten über die eingeführten Größen in Gleichung 3.1. Eine beispielhafte Kurve der allgemeinen Reifenkraft ist in Abbildung 3.4 zu sehen.

Anpassung der
Kurve an
Messungen

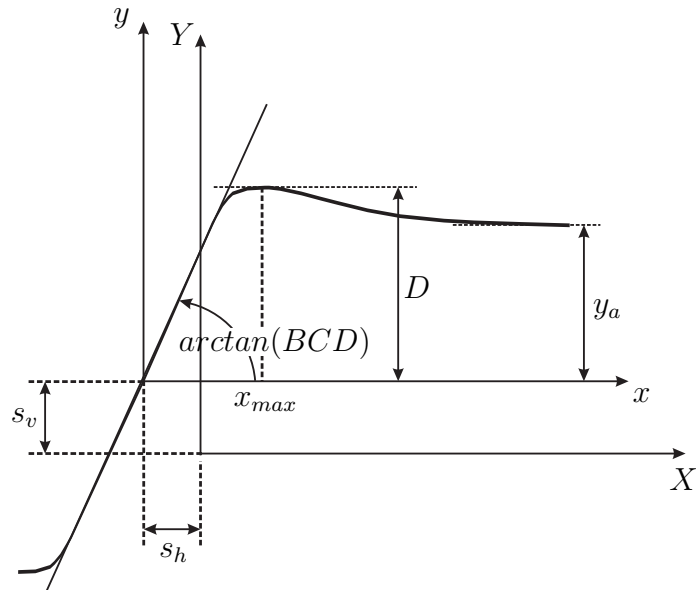


Abbildung 3.4: Reifenquerkraft nach PACEJKA [74]

Die wirkenden Querkräfte ergeben dann aufgrund der Lenkkinematik die an der Zahnstange wirkenden Kräfte. Auf eine genauere Betrachtung der Modellierung von Zahnstangenkraft und Reifenquerkraft wird hier nicht eingegangen, da diese bereits Teil der bestehenden Fahrzeugmodelle sind und in SCHRAMM (2010, [90]) nachgelesen werden können.

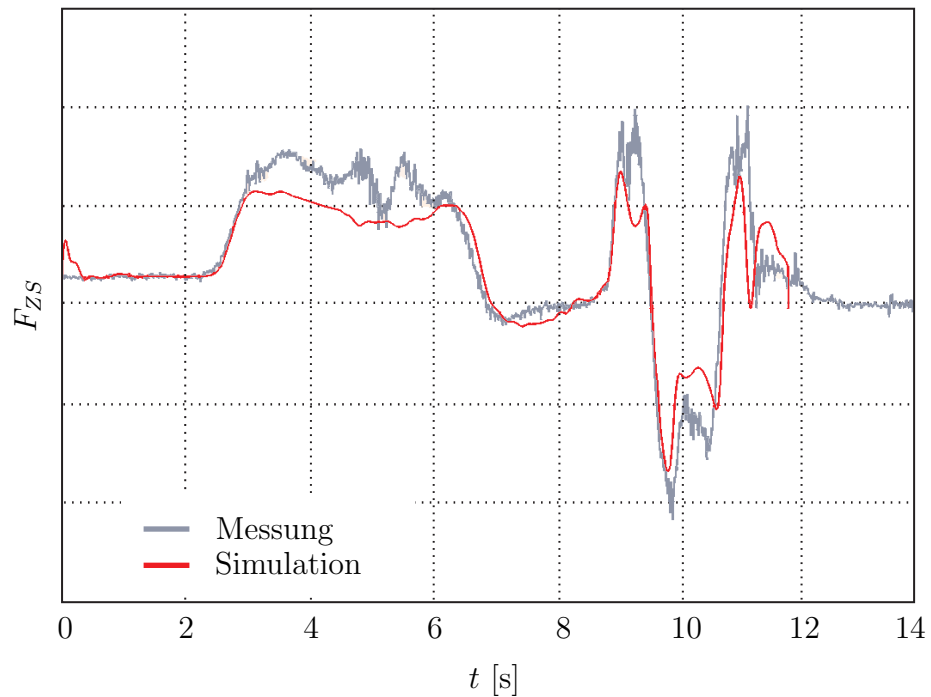


Abbildung 3.5: Vergleich der Zahnstangenkraft bei einem doppelten Spurwechsel

Die Abbildung 3.5 zeigt, dass die Simulation der Zahnstangenkräfte mit dem dargestellten Modell für einen doppelten Spurwechsel qualitativ sehr gut mit am realen Fahrzeug gemessenen Verläufen übereinstimmen.

Die erkennbaren Abweichungen zwischen simulierten und am realen Fahrzeug gemessenen Zahnstangekräften bei einem doppelten Spurwechsel ergeben sich aus Parameterunsicherheiten im Reifenmodell. Gerade die Reibwerte zwischen Fahrbahn und Reifen unterliegen größeren Schwankungen, so dass eine genaue Anpassung der Parameter nur für einen speziellen Fall vorgenommen werden kann und nur für Einzelfälle sinnvoll erscheint.

Schwankungen in Reibwerten nicht erfasst

3.3.2 Bohrmoment

Bei langsamer Fahrt, z. B. beim Parkieren, sind die Reifenquerkräfte nicht mehr von entscheidender Bedeutung. Hier ist das Verhältnis der Reifenrotation um die z-Achse ω_z^{Rad} zur Rotation um die y-Achse ω_y^{Rad} bei einer Lenkbewegung relativ groß. Damit wirkt vor allem das Bohrmoment gegen die Drehung des Reifens. Das Bohrmoment ist nach RILL (1994, [83]) mit vertretbarem Aufwand im Hinblick auf die Simulationszeiten nur schwer exakt berechenbar. Aus diesem Grund wird im Weiteren ein vereinfachtes Bohrmomentmodell hergeleitet, das eine Erweiterung des Modells von RILL [83] ist.

Bohrmoment bei langsamer Fahrt

Nach RILL [83] kann das Bohrmoment wie folgt angenähert werden:

$$\begin{aligned}
 T_{Bohr} &= \frac{1}{12} b_{Latsch}^2 \frac{dF_x^{Latsch}}{ds_x} \frac{\omega_z^{Rad}}{r_{Rad} |\omega_y^{Rad}|} \\
 &= \frac{1}{12} b_{Latsch} \underbrace{\frac{dF_x^{Latsch}}{ds_x}}_{\text{Längssteifigkeit}} \frac{b_{Latsch}}{r_{Rad}} \underbrace{\frac{\omega_z^{Rad}}{|\omega_y^{Rad}|}}_{\text{Bohrschlupf}}.
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

T_{Bohr}	Bohrmoment
b_{Latsch}	Breite des Latsches
F_x^{Latsch}	am Latsch angreifende Reifenlängskraft (Umfangskraft)
s_x	Längsschlupf
ω_z^{Rad}	Radwinkelgeschwindigkeit um Rad z-Achse
ω_y^{Rad}	Radwinkelgeschwindigkeit um Rad y-Achse
r_{Rad}	Radradius

$T_{Bohr,max}$

Die Berechnung des Bohrmoments ist über die Längssteifigkeit mit den aktuell vorherrschenden Reibverhältnissen der Straße gekoppelt. Wie leicht gesehen werden kann, nimmt das Bohrmoment entsprechend der Gleichung 3.2 bei kleinen Werten für ω_y^{Rad} sehr schnell große (nicht plausible) Werte an. Daher wird das Bohrmoment entsprechend der maximal möglichen Umfangskraft begrenzt. Das maximale Bohrmoment $T_{Bohr,max}$ liegt nach RILL [83] dann vor, wenn alle Teile des Latsches gleiten. Es ergibt sich somit

$$T_{Bohr,max} = -\frac{1}{4}b_{Latsch} \underbrace{F_{x,Gleit}^{Latsch}}_{\text{Umfangskraft im Gleitbereich}}. \quad (3.3)$$

$T_{Bohr,max}$ maximales Bohrmoment
 $F_{x,Gleit}^{Latsch}$ Umfangskraft im Gleitbereich

Insgesamt ergibt sich für das Bohrmoment nach RILL [83]

$$T_{Bohr} = \begin{cases} T_{Bohr} & \text{für } |T_{Bohr}| \leq T_{Bohr,max} \\ T_{Bohr,max} & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.4)$$

Elastizität Latsch
entscheidend

Reale Messungen im Stand zeigen jedoch, dass die Elastizität des Latsches für den Aufbau des Bohrmoments von entscheidender Bedeutung ist. Das Bohrmomentmodell nach RILL wird daher abgewandelt und um die Torsionssteifigkeit des Latsches erweitert.

Hubbewegung
der
Fahrzeugfront

Zudem wird die Hubbewegung der Fahrzeugfront zusammen mit dem Bohrmoment betrachtet. Der Hub der Fahrzeugfront aufgrund der Lenkbewegung ist streng genommen nicht Teil des Bohrmoments. Da ein signifikanter Hub allerdings nur bei sehr großen Lenkeinschlägen zu beobachten ist und diese eigentlich nur bei niedrigen Geschwindigkeiten (Bereich des Bohrmoments) vorkommen, ist die gemeinsame Betrachtung beider Effekte durchaus zielführend. Die Abbildung 3.6 verdeutlicht die Ein- und Ausgänge des hergeleiteten Modells.

Grobstruktur
Bohrmomentmo-
dell

Das in Abbildung 3.6 dargestellte Modell macht die Berechnung der Zahnstangenkraft F_{ZS} aufgrund der Eingänge q_Z und \dot{q}_Z möglich. Die Zahnstangenposition bzw. -bewegung q_Z bzw. \dot{q}_Z kann im Bohrmomentmodell aus der Lenkradbewegung über einfache kinematische Zusammenhänge ermittelt werden. Außerdem lässt sich



Abbildung 3.6: Blockdarstellung des Bohrmomentmodells

hieraus sofort die für das Bohrmoment notwendige Bewegung des Rades um seine z-Achse bestimmen. Das in dieser Arbeit verwendete Bohrmomentmodell besteht wie bereits geschildert aus den zwei Teilen

- Raddrehung und
- Heben der Fahrzeugfront.

Bohrmoment aus Raddrehung

Es wird davon ausgegangen, dass sich bei einer Drehung des Reifens um seine Hochachse (z-Achse) der Latsch zunächst elastisch verformt. Erst wenn die maximale elastische Verformung des Latsches erreicht ist, fängt er an zu gleiten. In der Abbildung 3.7 ist eine Torsionsfeder der Steifigkeit c_{Latsch} zu sehen. Die dargestellte Ebene \mathcal{L} kann um die z-Achse drehen, bis die maximale Latsch-Verformung erreicht ist. Dabei wird die Feder verformt und es ergibt sich ein zu der Verdrehung proportionales Bohrmoment. Danach gleitet der Latsch über die Ebene. Je nach Wahl des Bohrmoments bei maximaler Verdrehung des Latsches und der Gleitreibung des Latsches auf der Ebene können auch Slip-Stick Effekte beobachtet werden. Diese sind im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht von Interesse. Das so berechnete Bohrmoment ergibt sich für gebremste Vorderräder zu:

Elastische
Verformung

Gleiten des
Latsches

$$T_{Bohr} = \begin{cases} c_{Latsch} \delta_{Latsch} & \text{für } |\delta_{Latsch}| \leq \delta_{Latsch,max} \\ T_{Bohr,max} & \text{sonst} \end{cases} . \quad (3.5)$$

c_{Latsch}	Torsionssteifigkeit des Reifenlatsches
δ_{Latsch}	Verdrehung der Latschebene \mathcal{L}
$\delta_{Latsch,max}$	Verdrehung der Latschebene \mathcal{L} bei maximaler elastischer Verformung des Latsches

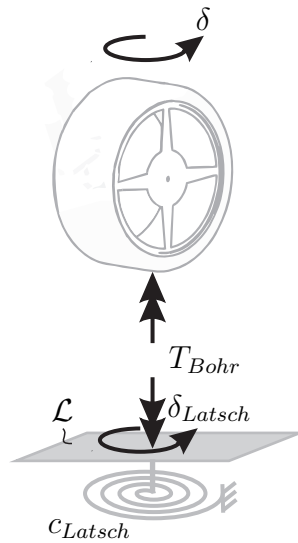


Abbildung 3.7: Bohrmoment

Umsetzen des
Moments auf
Zahnstangen-
kraft

Da das Bohrmoment an den Reifen aufgrund der beim Lenken veränderlichen Hebelverhältnisse jeweils in unterschiedlicher Weise auf die Zahnstange wirkt, muss der momentan wirkende effektive Lenkhebel l_{eff} bekannt sein. Hierfür kann sowohl die Kinematik der betrachteten Achse als kinematische Schleife betrachtet und gelöst werden (vgl. SCHRAMM 2010, [90]) als auch mit vermessenen Kennlinien gearbeitet werden. Bei einem Fahrzeug, für das ohne die genaue Kenntnis der geometrischen Abmaße an der gelenkten Achse im Nachhinein der Lenkhebel bestimmt werden soll, eignet sich dieses Vorgehen besser. In Abbildung 3.8 ist der gemessene effektive Lenkhebel für das linke Vorderrad eines Fahrzeugs qualitativ dargestellt.

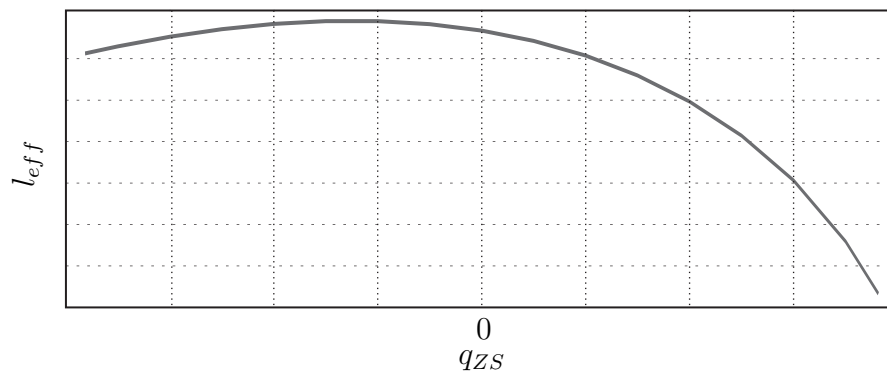


Abbildung 3.8: Effektiver Lenkhebel des linken gelenkten Vorderrads

Für das rechte Vorderrad ist die Kennlinie aufgrund der Achssymmetrie die entsprechende Spiegelung der dargestellten Kennlinie. Die jeweiligen Reifenmomente können mit Hilfe des Lenkhebels auf die wirkende Zahnstangenkraft umgerechnet werden. Es ergibt sich für die Zahnstangenkraft aufgrund der Raddrehung

Symmetrischer
Achsaufbau

$$F_{ZS,Bohr} = \frac{T_{Bohr}}{l_{eff}}. \quad (3.6)$$

$F_{ZS,Bohr}$ Zahnstangenkraft aufgrund der Raddrehung
 l_{eff} effektiver Lenkhebel

Abbildung 3.9 zeigt den qualitativen Verlauf der Zahnstangenkraft $F_{ZS,Bohr}$ aufgrund der Raddrehung $F_L \omega_z$ beim Manöver „Durchlenken im Stand“ (vgl. Kap. 4.1).

Der Verlauf der Zahnstangenkraft aufgrund der Verdrehung der gelenkten Räder weist zunächst einen linearen Anstieg auf. Dieser wird durch die elastische Verformung des Latsches verursacht. Sobald der Latsch über den Untergrund gleitet, wirkt das maximale Bohrmoment. Der Anstieg der Zahnstangenkraft kommt durch die bei der Bewegung des Rades veränderlichen Hebellängen zustande. Bei der Umkehr der Lenkrichtung ändert sich die Zahnstangenkraft zunächst wieder linear mit dem Winkel, bevor der Reifen in entgegengesetzter Richtung über den Untergrund gleitet.

Charakteristischer
Verlauf des
Bohrmoments

Zahnstangenkraft aufgrund des Fahrzeughubs

Neben der wirkenden Reifenkraft hat die Bewegung der Fahrzeugfront in z-Richtung beim Lenken einen entscheidenden Einfluss auf die an der Zahnstange wirkenden Kräfte. Zu großen Hub- und Senkbewegungen kommt es bei extremen Lenkradeinschlägen. Da dies normalerweise nur bei langsamer Fahrt z.B. im Bereich des Parkierens vorkommt, wird dieser Effekt hier zusammen mit dem Bohrmoment diskutiert.

Hubbewegung
Pkw-Front

Auch diese vertikale Bewegung des Fahrzeugs kann über geeignete Modelle des Fahrwerks berechnet werden. Wie bei dem effektiven Lenkhebel ist es jedoch so, dass auch hier eine nachträgliche Bestimmung für ein zu untersuchendes Fahrzeug

Kennlinienbasierte
Modellierung

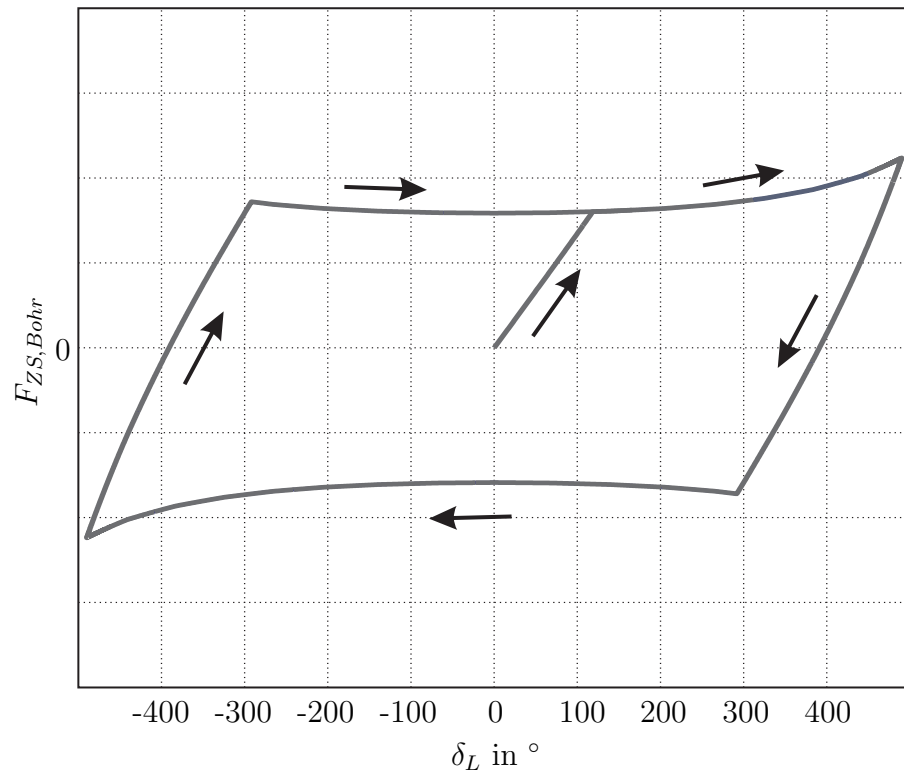


Abbildung 3.9: Zahnstangekraft aufgrund des Bohrmoments beim Durchlenken im Stand

nicht zweckmäßig ist. Eine Vermessung der vertikalen Fahrzeugbewegung beim Lenken ist sehr viel einfacher. Eine entsprechende Kennlinie für die linke Achsseite ist in Abbildung 3.10 qualitativ dargestellt.

Energetische
Betrachtung

Das Heben und Senken des Fahrzeugs als Funktion des Zahnstangenhubes q_{ZS} kann energetisch betrachtet werden. Hieraus ergibt sich dann die momentan wirkende Zahnstangenkraft

$$F_{ZS,Hub} = \frac{dz_{VA}}{dq_{ZS}} F_{VA,z} \quad (3.7)$$

$F_{ZS,Hub}$	Zahnstangenkraft aufgrund der Hubbewegung der Vorderachse
z_{VA}	Hub der Fahrzeugfront
q_{ZS}	Position der Zahnstange
$F_{VA,z}$	Gewichtskraft der Fahrzeugfront

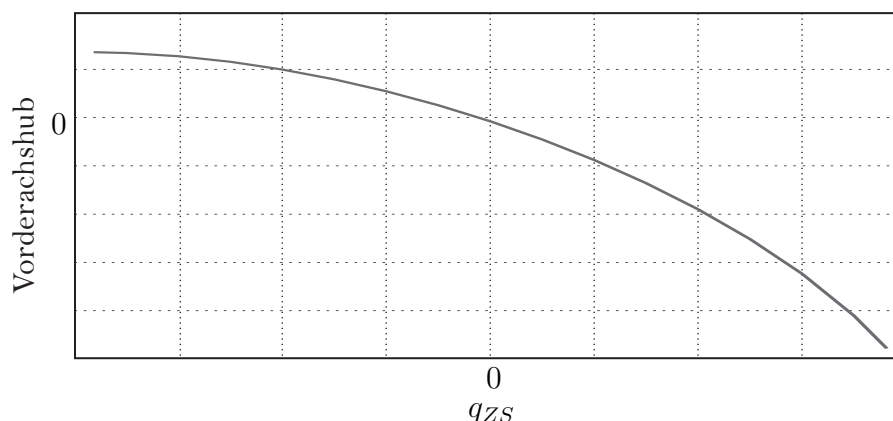


Abbildung 3.10: Vorderachshub (links) über dem Zahnstangenhub beim Lenken

Der charakteristische Verlauf der Zahnstangenkraft aufgrund der Hubbewegung des Fahrzeugs kann in Abbildung 3.11 gesehen werden.

Die Größenordnung der Zahnstangenkraft aufgrund der Hubbewegung $F_{ZS,Hub}$ ist deutlich geringer als die aufgrund der Raddrehung $F_{ZS,Bohr}$. Sie ist dennoch signifikant. Weiterhin wird deutlich, dass $F_{ZS,Hub}$ erst bei größeren Lenkradwinkeln ins Gewicht fällt. Charakteristisch für die Kraft aufgrund der Hubbewegung ist der zu erkennende punktsymmetrische Verlauf.

Zahnstangenkraft beim Lenken im Stand

Werden beide Anteile des Bohrmoments addiert, so ergibt sich die Gesamtzahnstangenkraft beim Lenken im Stand

Überlagerung
beider Effekte

$$F_{ZS} = F_{ZS,Bohr} + F_{ZS,Hub}. \quad (3.8)$$

Für das Lenken im Stand kann so die wirkende Spurstangenkraft ermittelt werden. Der Vergleich von Messung und Simulation in Abbildung 3.12 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

Sehr gute Über-
einstimmung

Der in Abbildung 3.12 gezeigte Verlauf ist charakteristisch für die Zahnstangenkraft beim Durchlenken im Stand. Hierbei wird in einer sinusartigen Lenkbewegung, angefangen bei 0° Lenkwinkel, das Lenkrad gedreht. Für die dargestellten

Qualitativer
Verlauf
Bohrmoment

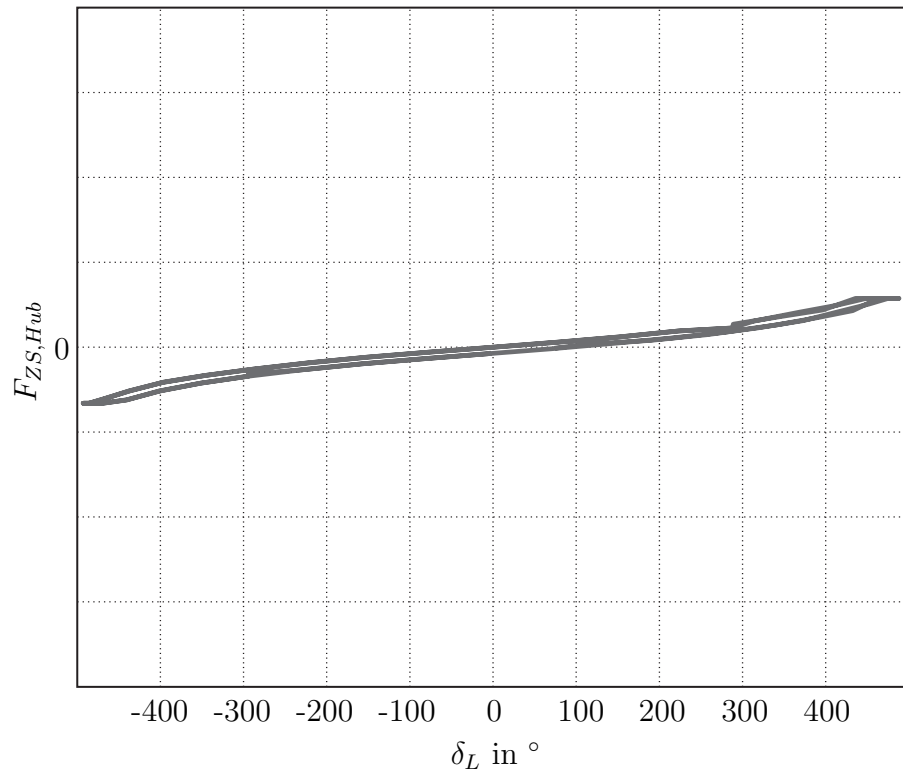


Abbildung 3.11: Zahnstangenkraft aufgrund der Fahrzeughubbewegung beim Durchlenken im Stand

Messungen wurde ein Lenkungsprüfstand mit Lenkroboter verwendet, der eine sehr gute Reproduzierbarkeit der vorgenommenen Messungen gewährleistet. Der Verlauf der Kraft zeigt sowohl für die Messung als auch die Simulation zunächst einen linearen Anstieg der Kraft bei zunehmendem Lenkwinkel. Dies entspricht der elastischen Verformung des Latsches. Sobald die Haftgrenze des Latsches erreicht ist, bleibt das maximale Moment bestehen. Die an der Zahnstange wirkende Kraft ändert sich bei weiter zunehmendem Lenkwinkel nun lediglich aufgrund der beim Lenken veränderlichen Hebelverhältnisse sowie dem Fahrzeughub.

Das dokumentierte Modell zur Bestimmung des Bohrmoments bedarf nur sehr weniger Parameter, um das Bohrmoment eines realen Fahrzeugs zu simulieren. Diese können mit relativ geringem Aufwand aus Messungen gewonnen werden oder Konstruktionszeichnungen des Fahrzeugs entnommen werden. Die Einfachheit des Modells garantiert zudem, dass das Modell auch in Echtzeit simuliert werden kann.

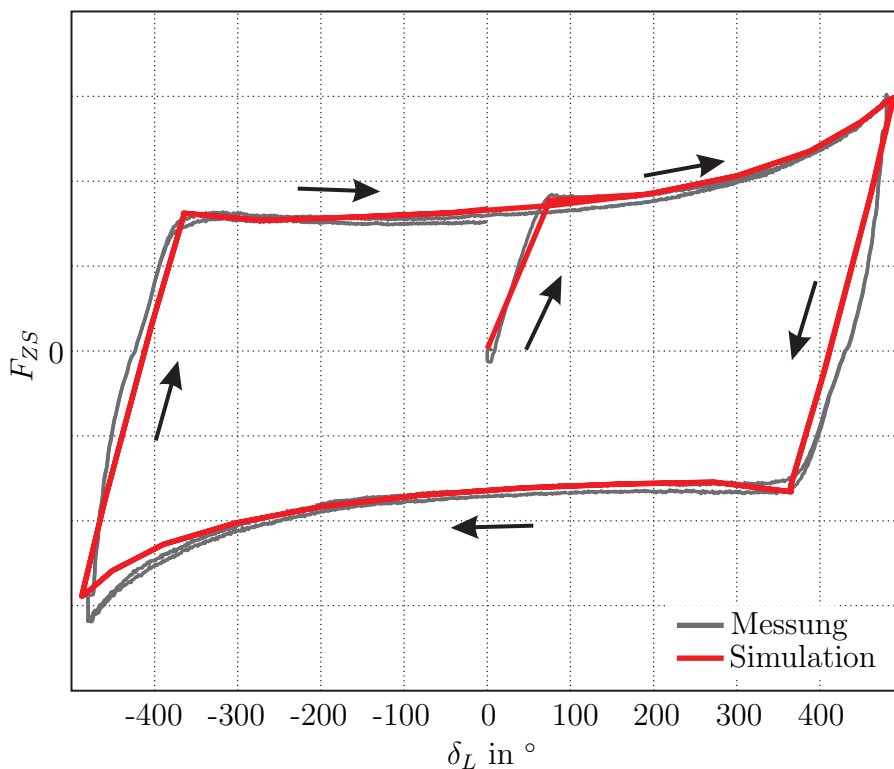


Abbildung 3.12: Vergleich des Bohrmomentmodells mit Messdaten

3.4 Elektromechanische Komponenten

Elektrische Verbraucher werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zum Großteil anhand ihrer mittleren Leistung modelliert. Entsprechend der Bordnetzspannung sowie ihrem Zustand (an- oder abgestellt) wird der Laststrom I_L ermittelt. Dieser geht dann in die Gleichungen des Bordnetzes ein (vgl. Kap. 3.5).

Laststrom

Dieses Vorgehen kann für statische Verbraucher, die jeweils diskrete Leistungsstufen aufweisen, gewählt werden. Sie bilden die Grundlast, die das Bordnetz belastet. In Kapitel 2.2 können solche Komponenten und deren Leistungen aus den entsprechenden Tabellen entnommen werden. Wie in Kapitel 2.2 jedoch bereits diskutiert, gibt es eine Vielzahl verschiedener Verbraucher, die eine kontinuierlich veränderliche Leistung benötigen. Diese ist zudem oftmals abhängig vom Fahrzustand. Solche Verbraucher, wie z. B. die elektrische Servolenkung, bedürfen einer genaueren Betrachtung und gesonderten Modellierung. Sie stellen die Kopplung von Bordnetz und Fahrzeugdynamik dar. Die gegebene Kopplung und das daraus resultierende Vorgehen in der Betrachtung der Wechselwirkungen wird im Rahmen dieser Arbeit anhand der elektrischen Servolenkung diskutiert. Darüber hinaus wird die Modellierung eines ESC-Systems als weiteres Beispiel beschrieben.

Kopplung
Mechanik,
Bordnetz

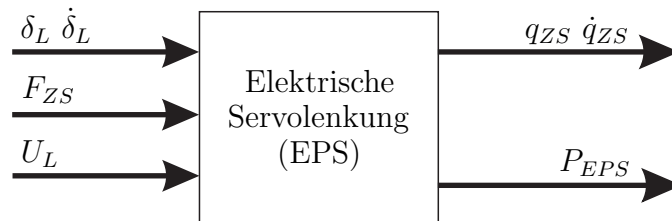


Abbildung 3.13: Blockschaltbild des EPS-Modells

3.4.1 Elektrische Servolenkung

Modell-
komponenten

Das Modell der elektrischen Servolenkung (EPS) umfasst sowohl den mechanischen Aufbau der Lenkung als auch den elektrischen Kern mitsamt Regelung, welcher letztendlich die Unterstützungskraft für den Fahrer aufbringt. Obwohl natürlich der mechanische Aufbau der Lenkung streng genommen nicht Teil der Servolenkung ist, wird er aus Gründen der Praktikabilität an dieser Stelle erläutert und als Teil der EPS behandelt. Damit kann ein EPS-Modell aufgebaut werden, das die Ein- und Ausgänge entsprechend der Blockdarstellung in Abbildung 3.13 hat.

Ein- und
Ausgänge EPS

Die Eingänge in das Modell bilden der vom Fahrer gestellte Lenkradwinkel δ_L , dessen zeitliche Änderung $\dot{\delta}_L$, die aufgrund der Fahrzeugbewegung auf die Zahnstange wirkende Kraft F_{ZS} sowie die momentane (an den Verbrauchern anliegende) Bordnetzspannung U_L . Die Ausgänge des Modells werden vom Zahnstangenhub/-geschwindigkeit q_{ZS}/\dot{q}_{ZS} sowie von der benötigten elektrischen Leistung P_{EPS} gebildet.

Die Abbildung 3.14 zeigt den strukturellen Aufbau der EPS mit allen beteiligten Teilsystemen, wie er ähnlich auch bei HENRICHFREISE in [51] oder REIMANN in [81] gefunden werden kann.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Komponenten des EPS-Modells näher erläutert.

Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau einer Lenkung besteht nach MITSCHKE (2003, [70]) aus den drei Teilen

- Lenkrad mit Lenksäule,
- Lenkgetriebe und
- Zahnstange mit Lenkgestänge.

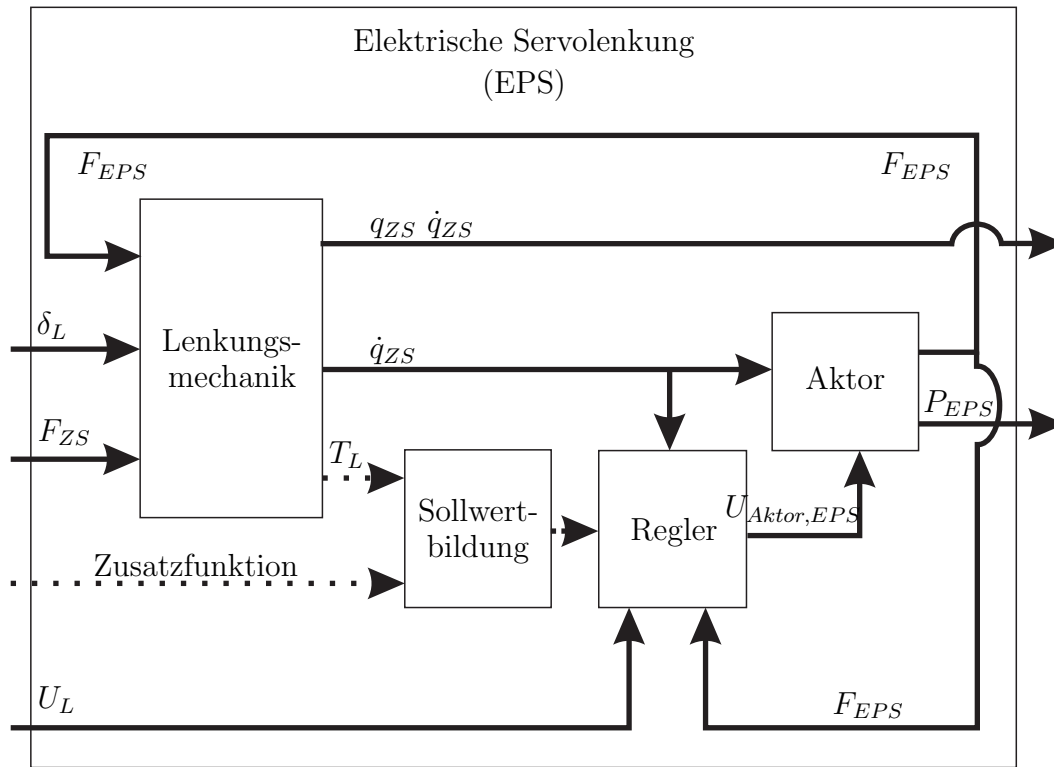


Abbildung 3.14: Struktureller Aufbau einer EPS

Das Lenkgestänge sorgt für die Übersetzung der Schubbewegung der Zahnstange in die Drehung der gelenkten Räder. Diese Übersetzung ist abhängig von der Bauweise der Radaufhängung und den wirkenden Hebelverhältnissen im jeweiligen Kfz. Das hier beschriebene Modell hat seine Systemgrenze bei der Bewegung der Zahnstange. Die Umsetzung auf die Raddrehung kann dann fahrzeugindividuell angepasst werden. Die Teile Lenkrad mit Lenksäule, das Lenkgetriebe sowie die Zahnstange sind in Abbildung 3.15 dargestellt.

Systemgrenzen

Die Zahnstange bildet zusammen mit dem Ritzel und den weiteren bewegten Teilen der Lenkung die effektive Masse m_{eff} . Auf diese wirken die Kräfte F_{Ritzel} , F_{ZS} , F_{Reib} sowie F_{EPS} . Die vom Fahrer über das Ritzel aufgebrachte Kraft F_{Ritzel} wird von der Servounterstützung durch die Kraft F_{EPS} verstärkt. Der Bewegung der Zahnstange wirkt eine Reibkraft F_{Reib} sowie die Rückstellkraft aufgrund der Fahrzeugbewegung F_{ZS} entgegen. Für die Bewegung der Zahnstange kann somit

Zahnstangenbewegung

$$m_{eff}\ddot{q}_{ZS} = F_{ZS} + F_{Reib} - F_{Ritzel} - F_{EPS} \quad (3.9)$$

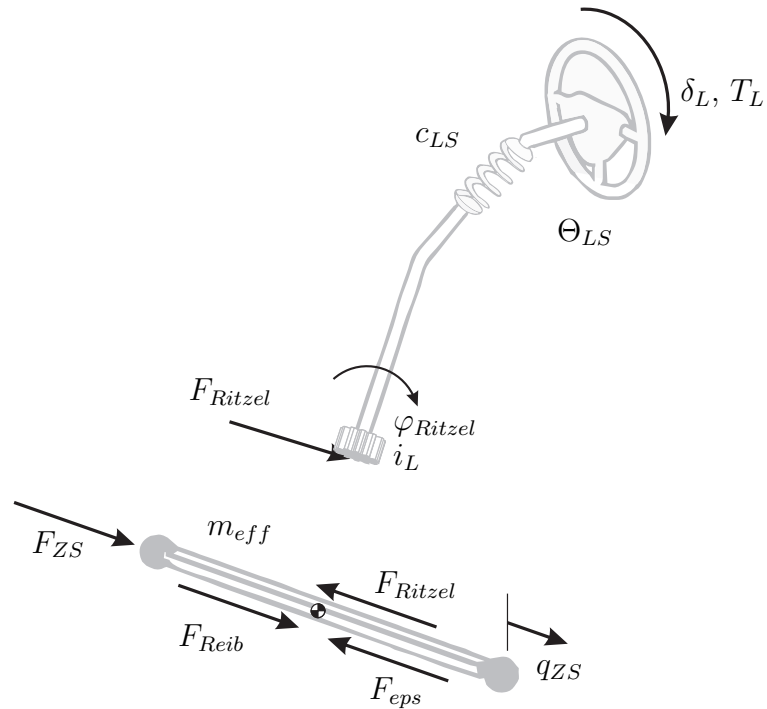


Abbildung 3.15: Mechanischer Aufbau einer Lenkung (stark vereinfacht)

m_{eff}	effektive Masse der Lenkung
q_{ZS}	translatorische Position der Zahnstange
F_{ZS}	Zahnstangenkraft aufgrund der Fahrzeugbewegung (Reifenrückstellkraft)
F_{Reib}	Reibkraft in der Lenkung
F_{Ritzel}	vom Fahrer an die Zahnstange übertragene Kraft
F_{EPS}	Assistenzkraft der EPS

Torsion
Drehfeder

geschrieben werden. Der Fahrer gibt seinen Richtungswunsch über das Lenkrad in das System ein. Dabei stellt er den Lenkradwinkel δ_L . Aufgrund der Drehbewegung der Lenksäule wird nun der Drehstab der Steifigkeit c_{LS} tordiert. Die Winkeldifferenz zwischen Lenksäule und Ritzel kann über die Zahnstangenstellung q_{ZS} und die Lenkübersetzung i_L mit

$$\begin{aligned}\Delta\delta &= \delta_L - \varphi_{Ritzel} \\ &= \delta_L - (-i_L q_z)\end{aligned}\tag{3.10}$$

δ_L	Lenkradwinkel
φ_{Ritzel}	Ritzelstellung
i_L	Lenkübersetzung (Ritzel zu Zahnstange)

angegeben werden. Der Torsionsstab am unteren Ende der Lenksäule dient im Kfz der Messung des vom Fahrer eingprägten Moments am Lenkrad. Aus der Fahrerhandmoment Verdrehung kann über den Zusammenhang

$$T_L = c_{LS} \Delta \delta \quad (3.11)$$

T_L Fahrerhandmoment
 c_{LS} Torsionssteifigkeit der Drehfeder

das Handmoment bestimmt werden. Dieses ist wichtig zur Sollwertbildung der EPS. Weiterhin kann die Kraft F_{Ritzel} mit

$$F_{Ritzel} = i_L T_L \quad (3.12)$$

angegeben werden.

Sollwertbildung und Regler

Die Sollwertbildung der EPS geschieht über eine Kennlinie. Dabei ist die Sollunterstützung abhängig von dem momentanen Handmoment des Fahrers. Die Abstimmung dieser Kennlinie ist fahrzeugspezifisch und zudem herstellerabhängig. Neben der reinen Unterstützung des Fahrers beim Lenken können mit Hilfe der elektrischen Servolenkung relativ leicht Funktionalitäten der lateralen Assistenz (z.B. Spurführung mit aktivem Lenkeingriff) realisiert werden. Hierzu wird der reinen Unterstützungskraft ein weiteres Moment überlagert.

EPS Aktuator

Als Aktuator der EPS dient ein Elektromotor. Dieser kann je nach Bauart der Servolenkung auf verschiedene Art an die Lenkung angebunden sein (vgl. Kap. 2.3.1). Das Moment des Aktuators kann jedoch in jedem Fall über die bauartbedingte Übersetzung in eine auf die Zahnstange wirkende Kraft umgerechnet werden. Für den als Aktuator verwendeten Gleichstrommotor kann nach SPRING (2009, [98]) das Ersatzschaltbild gemäß Abbildung 3.16 angenommen werden. Moderne EPS haben je nach Bauart und Fahrzeuggröße teilweise verschiedene Aktuatortypen. Es werden neben den Gleichstrommotoren auch Drehfeldmotoren eingesetzt [47].

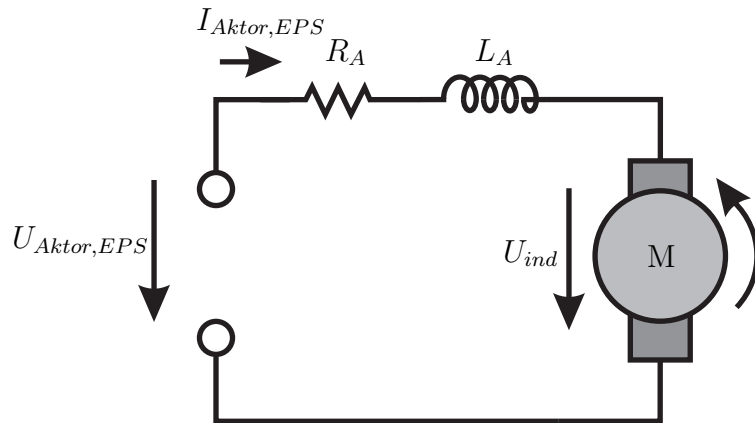


Abbildung 3.16: Ersatzschaltbild eines Gleichstrommotors [98]

Das Modell besteht aus einem Ankerwiderstand R_A , der Spuleninduktivität L_A sowie einer drehzahlabhängigen induzierten Spannung U_{ind} . Desweiteren wird von einem Permanentmagneten im Stator ausgegangen. Nach dem 2. Kirchhoff'schen Gesetz gilt

$$U_{Aktor, EPS} = U_{R_A} + U_{L_A} + U_{ind}. \quad (3.13)$$

$U_{Aktor, EPS}$	an dem Aktor angelegte Spannung
U_{R_A}	Spannungsabfall über Leitungswiderstände im Anker
U_{L_A}	Spannungsabfall über Ankerwicklung
U_{ind}	rückinduzierte Spannung

 U_{ind}

Die durch die Bewegung des Ankers im Magnetfeld induzierte Spannung U_{ind} ist proportional zur Winkelgeschwindigkeit ω_A des Ankers

$$U_{ind} = K \Phi_A \omega_A. \quad (3.14)$$

K	Proportionalitätskonstante
Φ_A	auf den Anker wirkender magnetischer Fluss
ω_A	Winkelgeschwindigkeit des Ankers

 ω_A

Die Winkelgeschwindigkeit ω_A kann aus der translatorischen Geschwindigkeit der

Zahnstange \dot{q}_{zs} und der Übersetzung zwischen Zahnstange und Aktor zu

$$\omega_A = i_A \dot{q}_z \quad (3.15)$$

i_A Übersetzung zwischen Aktuator und Zahnstange
in [1/m]

berechnet werden. Die beiden Größen U_{R_A} und U_{L_A} können über den durch den Anker fließenden Strom bestimmt werden. Es ergibt sich insgesamt die Differentialgleichung

$$U_{Aktor, EPS} = R_A I_{Aktor, EPS} + L_A \frac{dI_{Aktor, EPS}}{dt} + \Phi_A i_A \dot{q}_z. \quad (3.16)$$

$I_{Aktor, EPS}$ elektrischer Strom durch die Ankerwicklung

Der über den Anker fließende Strom I_{Aktor} ist proportional zu dem vom Aktor erzeugten Moment

$$T_A = K \Phi_A I_{Aktor, EPS}. \quad (3.17)$$

T_A vom Aktor erzeugtes Moment

Da der Aktor über ein Getriebe mit der Übersetzung i_A an die Zahnstange angebunden ist, ergibt sich hieraus die Assistenzkraft an der Zahnstange zu

$$\begin{aligned} F_{EPS} &= i_A T_A \\ &= i_A \Phi_A I_{Aktor, EPS}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

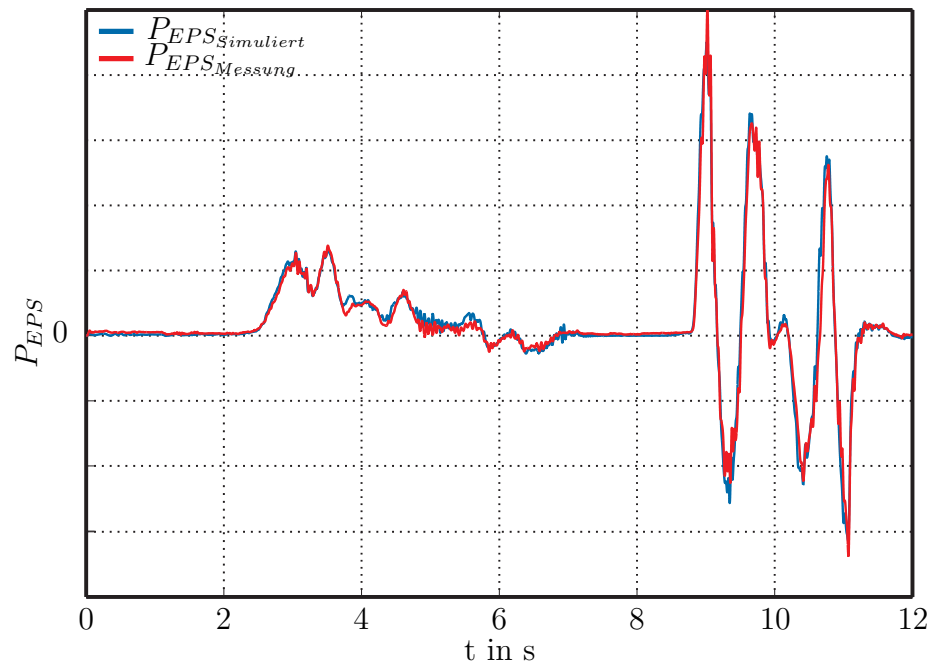


Abbildung 3.17: Vergleich der gemessenen und simulierten Leistung einer EPS

Validierung EPS-Modell

Vergleich Testmanöver

Zur Validierung des EPS-Modells werden gemessene Verläufe der Lenkleistung bei verschiedenen real gefahrenen Testmanövern herangezogen. Das EPS-Modell wird mit den gemessenen Verläufen für die Spurstangenkraft sowie der Bordnetzspannung und des Lenkradwinkels beaufschlagt, so dass dieses getrennt von den übrigen Modellstücken mit der entsprechenden Messung verglichen werden kann. Die Abbildung 3.17 zeigt diesen Vergleich der Lenkleistung aus der Simulation und dem realen Fahrmanöver bei einem doppelten Spurwechsel. Wie zu sehen ist, können die Parameter des Lenkungsmodell so gewählt werden, dass die Lenkleistungen aus Simulation und Messung eine sehr gute Deckung zeigen.

3.4.2 Electronic Stability Control (ESC)

Elektrohydraulisches ESC

Das ESC stabilisiert¹ das Fahrzeug durch gezielte Bremseingriffe an den Reifen. In modernen Kraftfahrzeugen wird der nötige Bremsdruck weiterhin durch eine Hydraulikpumpe aufgebaut, die einen elektromechanischen Wandler darstellt. Damit

¹Das Fahrzeug wird in einem stabilen Fahrzustand gehalten oder dorthin überführt. Ein Schleudern des Fahrzeugs kann somit wirkungsvoll vermieden werden und das Fahrzeug bleibt für den Normalfahrer beherrschbar.

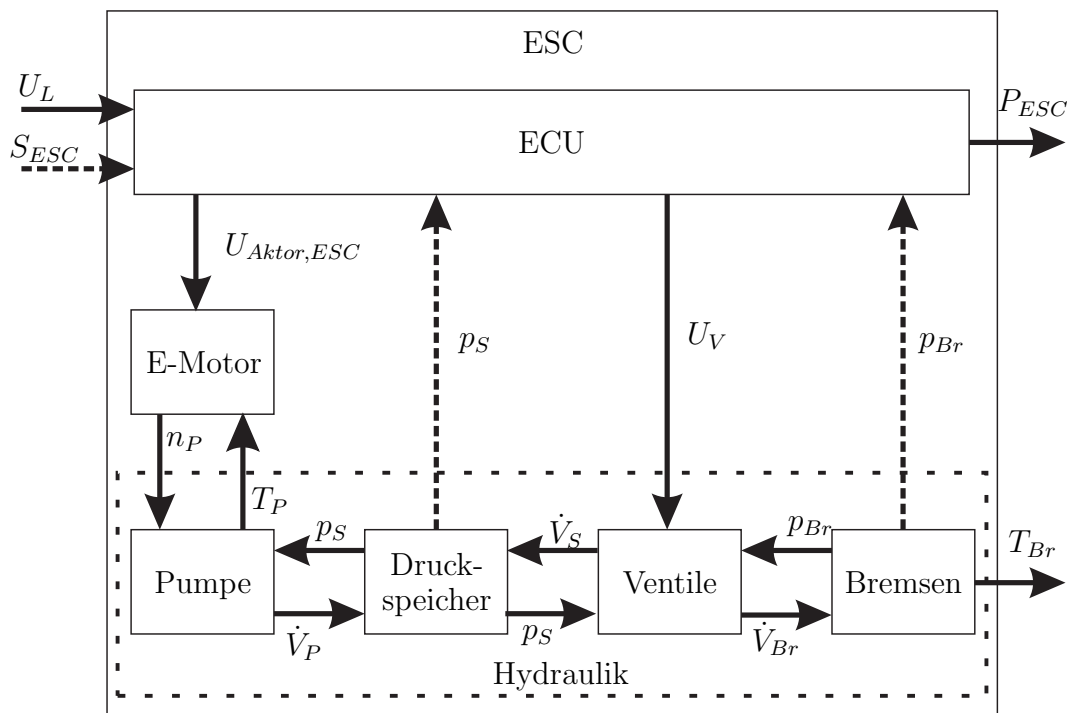


Abbildung 3.18: Struktur des ESC Modells

muss die nötige Leistung zum Betrieb der Pumpe aus dem Bordnetz entnommen werden. Gerade bei schnellen Lenkbewegungen, die zum Einsatz des ESC führen können, muss demnach nicht nur die Leistung für eine EPS sondern auch für das ESC von Generator und Batterie bereitgestellt werden. In Abbildung 3.18 wird die Modellstruktur eines ESC-Modells vorgestellt.

Das Steuergerät (ECU) des ESC erhält das Signal, den Bremsdruck an einzelnen Rädern aufzubauen. Basierend auf diesem Signal wird dann eine Spannung an verschiedene Ventile angelegt, damit sich diese öffnen. Sobald das jeweilige Ventil geöffnet wird, strömt Hydraulikfluid vom Druckspeicher in die Bremskolben. Der Fluiddruck wird über die Kolbenfläche in die Anpresskraft der Bremsbeläge an die Bremsscheiben umgesetzt. Es resultiert letztendlich das gewünschte Bremsmoment.

Gesamtstruktur

Da für diesen Vorgang dem Druckspeicher Volumen entnommen werden muss, sinkt hier zwangsläufig der Füllgrad und damit auch der Druck. Das System versucht nun, den Druck (Füllstand) im Druckspeicher aufrecht zu erhalten. Hierfür wird von der ECU die am E-Motor anliegende Spannung so geregelt, dass die Hydraulikpumpe genügend Volumen nachfördert.

Speicherdruck
möglichst
konstant

An der ECU liegt die momentane Bordnetzspannung an. Sie bildet demnach die Obergrenze der für die Ansteuerung von Pumpe und Ventilblock verfügbaren Span-

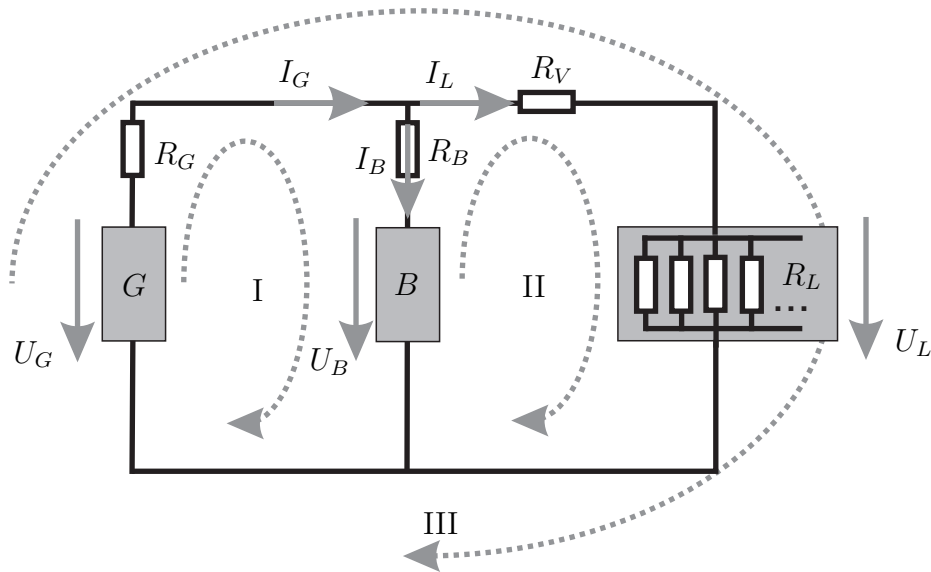


Abbildung 3.19: Modellierung eines klassischen Einbatterie-Bordnetzes

nung. Die von den elektrischen Bauteilen aufgenommene elektrische Leistung belastet entsprechend das Bordnetz. An dieser Stelle wird darauf verzichtet eine detaillierte modelltechnische Betrachtung des ESC durchzuführen, da diese im weiteren Verlauf der Arbeit nicht benötigt wird. Die Gesamtstruktur zeigt allerdings, wie das System ESC mit dem Bordnetz zusammenwirkt.

3.5 Bordnetz

System Bordnetz

Als Bordnetz wird hier die Gesamtheit der elektrischen Verbraucher und Energiequellen betrachtet. Wie in Kapitel 2.1.1 bereits dargestellt, besteht das klassische Einbatterie-Bordnetz aus den drei Teilen Generator, Batterie und Verbrauchern. Das Bordnetz ist über die elektrische Servolenkung sowie durch den Einsatz verschiedener Assistenz- und Regelsysteme mit der Fahrzeugdynamik gekoppelt.

Abbildung 3.19 zeigt das Ersatzschaltbild eines klassischen Ein-Batterie-Bordnetzes.

Knotenregel

Die Modellierung des Bordnetzes beruht auf den Kirchhoff'schen Regeln der Elektrotechnik. So kann für die oben gezeigte Schaltung

$$I_G = I_B + I_L \quad (3.19)$$

nach der Knotenregel angegeben werden.

Für die Maschen I bis III können nach der Maschenregel die Gleichungen

Maschenregel

$$\begin{aligned}
 U_G - U_{RG} - U_{RB} - U_B &= 0, \\
 U_B + U_{RB} - U_{RV} - U_L &= 0, \\
 \text{und} \\
 U_G - U_{RG} - U_{RV} - U_L &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

U_G	Generatorspannung
U_{RG}	Spannungsabfall in der Leitung zum Generator
U_B	Batteriespannung
U_{RB}	Spannungsabfall in der Leitung zur Batterie
U_L	Spannungsabfall über alle Verbraucher
U_{RV}	Spannungsabfall aufgrund von Leitungswiderständen

angegeben werden. Durch einfache Umformungen nach dem Ohm'schen Gesetz ergeben sich aus den Gleichungen 3.20 die Beziehungen

$$\begin{aligned}
 I_B &= \frac{(U_G - R_G I_L - U_B)}{R_G + R_B} \\
 \text{und} \\
 I_G &= \frac{U_L + (R_B + R_V) I_L - U_B}{R_B}.
 \end{aligned}
 \tag{3.21}$$

Hierbei stehen die Widerstände der Leitungen als Systemparameter fest. Die Spannung des Generators U_G und die Batteriespannung U_B sind abhängig vom Betrieb des Bordnetzes und stellen Systemeingänge dar. Der kumulierte Verbraucherstrom I_L bildet sich abhängig von den momentan zu versorgenden Verbrauchern und ist ein weiterer Systemeingang für das Bordnetz. Die Spannung U_L , die an dem Verbraucherwiderstand R_L abfällt, kann durch das Einsetzen der Gleichungen 3.21 in 3.19 zu

$$U_L = \frac{(U_G - R_G I_L - U_B) R_B}{R_G + R_B} + I_L R_B - (R_B + R_V) I_L + U_B
 \tag{3.22}$$

bestimmt werden.

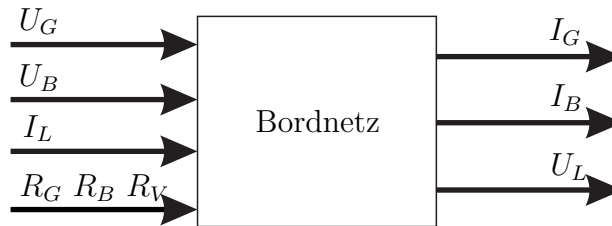


Abbildung 3.20: Blockdarstellung des Bordnetzes

Blockschaltbild
Bordnetz

In Abbildung 3.20 ist das so beschriebene Bordnetzmodell als Block mit den gegebenen Ein- und Ausgängen dargestellt.

Die Widerstände R_G , R_B und R_V können als konstant angenommen werden. Die Modellstruktur ermöglicht jedoch auch jederzeit eine Erweiterung um veränderliche (z.B. temperaturabhängige) Leitungswiderstände.

Die Systemeingänge Laststrom I_L , die Batteriespannung U_B und die Generatorspannung U_G können aus weiteren Teilmodellen bestimmt werden, welche im Folgenden vorgestellt werden.

3.5.1 Grundlast

Verbraucher-
modelle
erweiterbar

Neben der EPS und dem ESC gibt es weitere innovative elektrische Hochleistungsverbraucher. Die in dieser Arbeit gezeigte Modellstruktur lässt deren Einbindung mit einem eigenen Modell einfach zu.

Im Weiteren werden die in Tabelle 2.4 aufgeführten Verbraucher mit der entsprechenden Leistung im Bordnetzmodell betrachtet. Mit der nach Gleichung 3.22 berechneten Verbraucherspannung kann aus der Gesamtleistung aller aktiven Verbraucher der kumulierte Verbraucherstrom

$$I_L = \frac{P_L}{U_L} \quad (3.23)$$

ermittelt werden. So können beliebige Lastprofile sehr schnell umgesetzt werden. Einzelne Verbraucher können zudem einzeln oder als Gruppe ein- und ausgeschaltet werden. Dies ist für eine Analyse des Bordnetzes unter dem Gesichtspunkt des Energiemanagements von entscheidender Bedeutung.

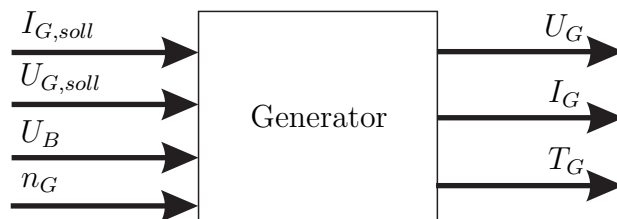


Abbildung 3.21: Blockdarstellung des Generators

3.5.2 Generator

Abhängig von dem Betriebspunkt des Generators liefert dieser elektrische Energie und versorgt im Idealfall alle Komponenten im Bordnetz. Das Generatormodell als Übertragungsblock kann in Abbildung 3.21 gesehen werden.

Blockschaltbild
Generator

Nach REIF (2009, [80]) besteht jeder Fahrzeuggenerator aus den Teilen

Generatorteile

- Magnetkreis des Erregerfeldes,
- Spannungserzeugung in der Drehstromwicklung,
- Gleichrichtung der Dreiphasenwechselspannung und
- Ausgangsspannungsregelung.

Das Generatormodell basiert auf einer Spannungsregelung. Die gewünschte Generatorspannung liegt im Normalfall bei ca. 14 V und ermöglicht ein gleichzeitiges Laden der Batterie und die Versorgung aller Verbraucher mit Strom. Zur Regelung der Generatorspannung wird das Erregerfeld gezielt beeinflusst. In den Statorspulen wird durch die Drehung des Rotors mit der Erregerspule eine Spannung induziert. Die so entstehende 3-phasige Wechselspannung wird dann in einem weiteren

Allgemeine Gene-
ratorfunktion

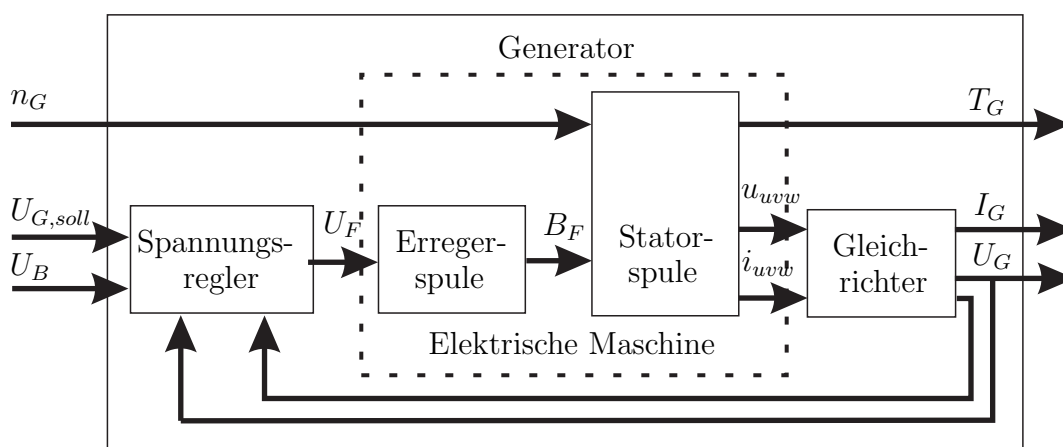


Abbildung 3.22: Detaillierte Blockdarstellung des Generators

Schritt mittels Diodenbrücken gleichgerichtet, so dass die für das Kfz-Bordnetz nötige Gleichspannung anliegt.

Neben den bereits erwähnten Teilstücken des Generators ist in der Abbildung 3.22 zu sehen, welche Werte zwischen den Blöcken übergeben werden. Im Folgenden werden die Funktionen von Spannungsregler, Erreger- und Statorspule sowie des Gleichrichters näher erläutert und Teilmodelle beschrieben [16].

Elektrische Maschine

Erregerspule

Die Erregerspule hat die Aufgabe, die magnetische Flussdichte des Erregerfelds B_F aufzubauen. Beim Anlegen der Spannung U_F an der Erregerspule stellt sich ein Strom I_F ein, der zu einem entsprechenden Erregerfeld führt [16]. Für den Erregerspulenstrom I_F kann folgende Beziehung angegeben werden:

$$\begin{aligned} U_F &= U_{RF} + U_{LF} \\ &= R_F I_F + L_F \frac{dI_F}{dt} \\ \Leftrightarrow I_F &= \frac{1}{L_F} \int (U_F - R_F I_F) dt. \end{aligned} \quad (3.24)$$

U_F	Erregerspulenspannung
U_{RF}	Spannungsabfall über ohmschen Widerstand in Erregerspule
U_{LF}	Spannungsabfall über Induktivität in Erregerspule
I_F	Strom in Erregerspule
L_F	Induktivität der Erregerspule

Aus dem fließenden Erregerstrom I_F kann nach BÖGE [15] näherungsweise mit

$$H_F = \frac{N}{l_F} I_F \quad (3.25)$$

H_F	magnetische Feldstärke durch Erregerspule
N	Wicklungszahl
l_F	mittlere magnetische Weglänge

die magnetische Feldstärke H_F berechnet werden. Die magnetische Flussdichte B_F ergibt sich dann aus der Magnetisierungskennlinie

$$B_F = f(H_F). \quad (3.26)$$

B_F magnetische Flussdichte

Da das Erregerfeld mit der Erregerspule bewegt wird, muss zur Berechnung der in die Statorspulen induzierten Spannungen das effektiv wirksame Erregerfeld herangezogen werden. Die Rotationsfrequenz des Drehfeldes ist proportional zur Generatordrehzahl. Laut SCHRÖDER [92] gilt

$$\begin{aligned} \omega_G &= 2\pi n_G \\ \text{und} \\ \omega_{int} &= p\omega_G. \end{aligned} \quad (3.27)$$

p Polpaarzahl (typisch 6 oder 7)
 n_G Generatordrehzahl
 ω_{int} interne Winkelgeschwindigkeit des elektr. Teilsystems

Die Umrechnung der Winkelgeschwindigkeit ω_G auf die interne Winkelgeschwindigkeit ω_{int} erfolgt dabei, um bei je drei Spulen pro Polpaar mit nur drei Spulen im Modell zu rechnen. Die höhere Dynamik des Generators ergibt sich im Modell aus der so gedanklich erhöhten Drehzahl.

Für die in den Statorspulen induzierte Spannung ist neben der Winkelgeschwindigkeit der effektiv wirksame magnetische Fluss Φ_{eff} entscheidend. Dabei ist zu beachten, dass die Erregung des Feldes durch die in den Spulen fließenden Ströme abgeschwächt wird [104]. Es gilt

$$\begin{aligned} \Phi_{eff,j} &= \Phi_{F,j} - \Phi_{k,j} \\ j &= u, v, w \end{aligned} \quad (3.28)$$

Φ_{eff} effektiv wirksamer magnetischer Fluss
 Φ_F magnetischer Fluss in den Spulen

Statorspule

Effektives Feld in Statorspulen

Φ_k Kompensation des magnetischen Flusses durch
 Strom in Statorspule
 u, v, w Generatorwicklungen

Aufgrund der Relativbewegung von Erreger- und Statorspule ist auch bei einer konstanten magnetischen Flussdichte B_F in den Erregerspulen der magnetische Fluss Φ_F durch die Statorspulen veränderlich. Hierfür kann die Beziehung

$$\Phi_{F,j} = B_F \underbrace{A \sin(\Theta_j)}_{A^*} \quad (3.29)$$

$j = u, v, w$

Θ_{int} Drehwinkel des Generatormodells
 Θ_j Drehwinkel der Spule j
 A Ausgangsquerschnittsfläche
 A^* durchströmte Querschnittsfläche

Spulendrehwinkel angegeben werden [15]. Die durchflutete Querschnittsfläche A^* ergibt sich aus dem momentanen Drehwinkel Θ der jeweiligen Spule sowie der Ausgangsquerschnittsfläche A . Dabei gilt bei einer Verdrehung der Spulen um je 120°

$$\begin{aligned} \Theta_u &= \Theta_{int} = \int \omega_{int} dt, \\ \Theta_v &= \Theta_{int} - \frac{3}{2}\pi \text{ und} \\ \Theta_w &= \Theta_{int} + \frac{3}{2}\pi. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Selbstinduktion Die teilweise Kompensation des Erregerfeldes durch den fließenden Strom kann über

$$\Phi_{k,j} = \frac{L_j}{N} i_j \quad (3.31)$$

i_j Wechselstrom durch Statorspule j
 L_j Induktivität der Statorspule j

bestimmt werden [15]. Unter der Annahme, dass der Generatorstrom I_G gleich dem Generatorsollstrom $I_{G,soll}$ ist, können die in den jeweiligen Spulen fließenden Ströme zu

$$\begin{aligned} i_j &= \hat{I} \sin(\Theta_j) \text{ mit} \\ \hat{I} &= I_{G,soll} \frac{\pi}{3} \end{aligned} \quad (3.32)$$

bestimmt werden. Die in den Statorspulen induzierte Spannung lässt sich dann mit

$$u_{j,ind} = \omega_{int} p k_{ind} \Phi_{eff,j} \quad (3.33)$$

$u_{j,ind}$ induzierte Wechselspannung in Statorspule j
 k_{ind} Induktionskoeffizient

angeben [104]. Durch die verschiedenen Polpaare ergibt sich so eine Wechselspannung.

Die in 3.33 berechneten Spulenspannungen sind die Spannungen im Leerlauf. Wird der Generator belastet, fließt ein Strom, welcher die einzelnen Spannungen entsprechend

Wechselspannung
an Klemmen

$$u_j = u_{j,ind} - R_j i_j \quad (3.34)$$

R_j ohmscher Widerstand der Statorspule j

herabsetzt. Die Spannung u_j ist die an den Klemmen der einzelnen Polpaare messbare Wechselspannung. Die Summe aller dieser Spannungen ergibt die Generatorklemmenspannung, welche am nachfolgenden Gleichrichter in die benötigte Gleichspannung gewandelt wird.

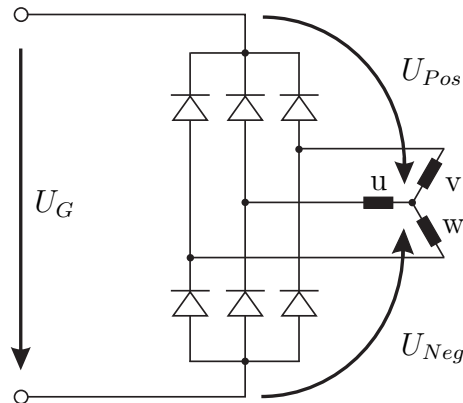


Abbildung 3.23: Gleichrichterschaltung nach HENNEBERGER (1990, [50])

Gleichrichter

Gleichrichter
Schaltbild

Der Gleichrichter besteht aus sechs Dioden, die den Stromfluss so beeinflussen, dass sich die gewünschte Gleichspannung ergibt [17, 50]. Das Schaltbild des Gleichrichters kann in Abbildung 3.23 gesehen werden. Die auf das Bordnetz wirkende Gesamtgeneratorspannung U_G wird mit

$$U_G = U_{Pos} - U_{Neg} \quad (3.35)$$

U_{Pos} Potential zwischen Spulen und positiver Generatorklemme
 U_{Neg} Potential zwischen Spulen und negativer Generatorklemme

berechnet. Die Spannungen U_{Pos} und U_{Neg} ergeben sich aus

$$\begin{aligned} U_{Pos} &= \max(u_{Pos,j}) \text{ und} \\ U_{Neg} &= \min(u_{Neg,j}) \text{ mit} \\ j &= u, v, w. \end{aligned} \quad (3.36)$$

$u_{Pos,j}$: Potential zwischen der Spule j und der positiven Generatorklemme
 $u_{Neg,j}$: Potential zwischen der Spule j und der negativen Generatorklemme

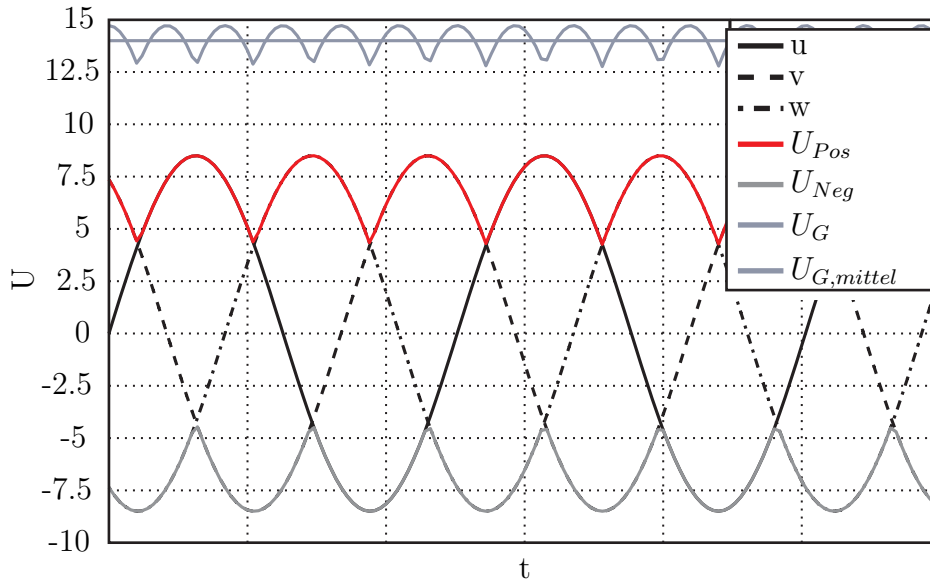


Abbildung 3.24: Spannungsverläufe an einem Gleichrichter nach BÄKER (2006, [17])

Dabei muss angemerkt werden, dass die als Wechselspannung eingeführten Größen $u_{Pos,i}$ und $u_{Neg,i}$ im Grunde lediglich die positiven bzw. negativen Halbwellen der zugehörigen Wechselspannungen darstellen. Die daraus resultierenden Größen U_{Pos} sowie U_{Neg} werden als Gleichspannung bezeichnet. Gedanklich wird demnach in Gleichung 3.36 der Schritt von einer Wechsel- hin zu einer Gleichspannung vollzogen. Die in den Gleichungen 3.35 und 3.36 gegebenen Zusammenhänge können in Abbildung 3.24 gesehen werden.

Wechsel- zu
Gleichspannung

$$\begin{aligned}
 u_{Pos,j} &= \begin{cases} u_j - \overbrace{U_{durch,K} \text{sign}(i_j)}^{\text{Diodendurchlassspannung}} - \overbrace{(i_j R_D + \frac{di_j}{dt} L_D) \text{sign}(i_j)}^{\text{Spannungsabfall über RL-Glied}} & \text{für } u_{Pos,j} \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \\
 u_{Neg,j} &= \begin{cases} u_j + U_{durch,K} \text{sign}(i_j) + (i_j R_D + \frac{di_j}{dt} L_D) \text{sign}(i_j) & \text{für } u_{Pos,j} \leq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \\
 j &= u, v, w.
 \end{aligned}
 \tag{3.37}$$

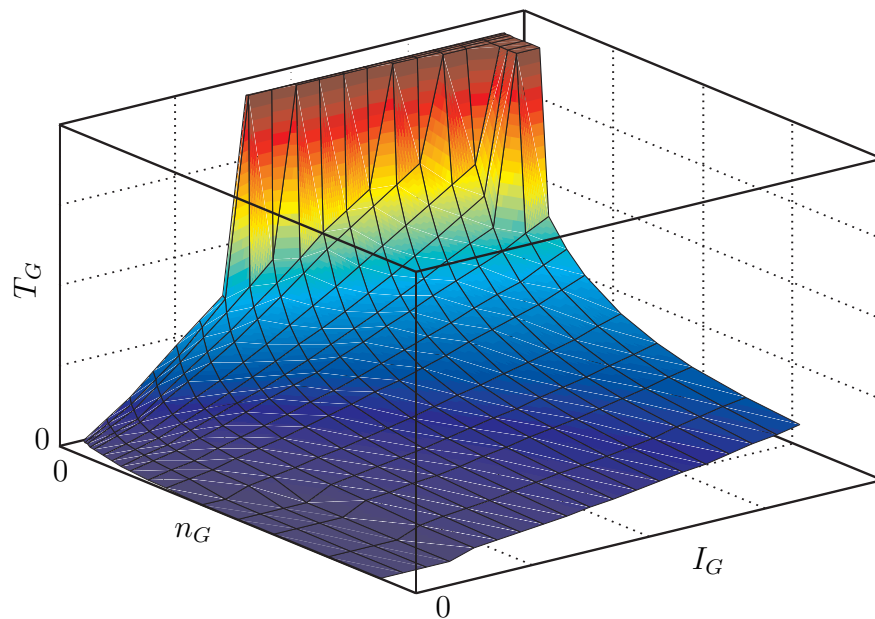


Abbildung 3.25: Kennfeld zur Modellierung des Generatorlastmoments

Die bisher gezeigten Gleichungen stellen die Wirkrichtung des Generators von der Mechanik zur Elektrotechnik dar. Der Generator wird in seiner Funktion als Energiequelle beschrieben. Die Rückwirkung auf den Antriebsstrang erfolgt über das Generatorlastmoment T_G .

Spannungsregler

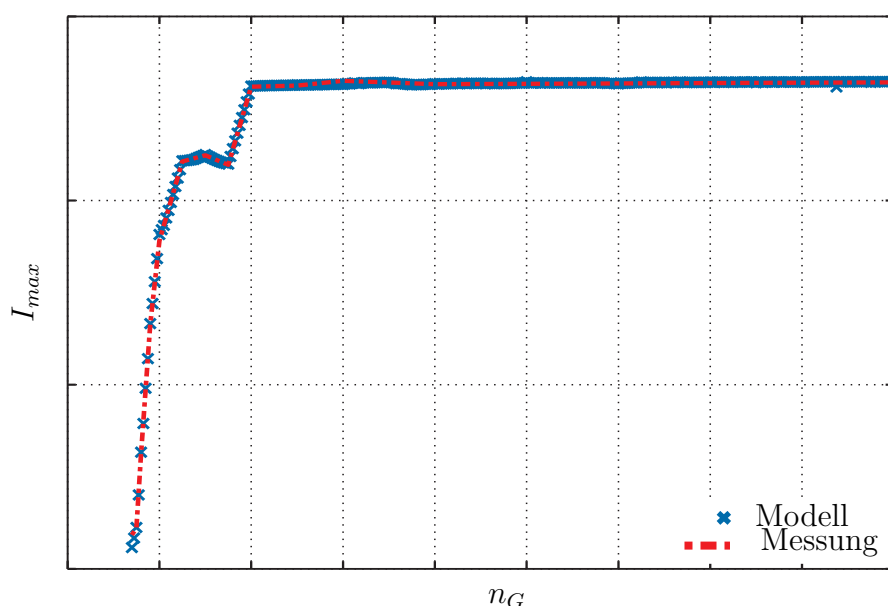
Funktion
Spannungsregler

Der Spannungsregler regelt die an der Erregerspule anliegende Spannung U_F so, dass sich die gewünschte Generatorspannung U_G am Generatorausgang einstellt. Hierfür benötigt der Spannungsregler zum einen die Generatorsollspannung $U_{G,soll}$ sowie die Generatorspannung U_G . Weiterhin wird eine Versorgungsspannung benötigt, um den Reglerausgang U_F zu gewährleisten. Hierfür wird beim Hochlauf des Generators die Batteriespannung U_B verwendet. Wenn sich der Generator in einem stabilen Betriebspunkt befindet, ist er selbsterregend und U_F wird aus der Generatorspannung U_G gebildet.

Generatorlastmoment

Generatorlast-
moment

Das Moment, das der Generator auf den Verbrennungsmotor aufbringt, ist abhängig von der momentanen Drehzahl und der bereitgestellten elektrischen Leistung. Entsprechend der physikalischen Zusammenhänge der Lorenzkraft und der Wirkungsgrade kann es für den jeweiligen Generator errechnet werden.



Abbildungung 3.26: Vergleich des maximalen Generatorstroms aus Messung und Modell

Zur Vereinfachung der Modellbildung wird in dieser Arbeit auch im Hinblick auf die Rechenzeiten jedoch mit einem vermessenen Kennfeld gearbeitet. Das verwendete Kennfeld zur Modellierung des Generatorlastmoments kann in Abbildung 3.25 gesehen werden.

Kennfeld für
Generatorlast-
moment

Das Generatorlastmoment T_G ergibt mit der jeweiligen Drehzahl die Generatoreingangsleistung. Bei einer konstanten Drehzahl n_G steigt das Moment T_G mit steigendem Generatorstrom I_G . Dieser Zusammenhang ist für weite Teile des Kennfelds, wie zu erwarten, proportional. Für kleine Drehzahlen n_G zeigt sich allerdings sehr deutlich, dass das Lastmoment sprunghaft ansteigt. Hier wird der Generator an seinen Grenzen betrieben und kann teilweise nicht mehr den geforderten Strom liefern.

Validierung des Generatormodells

Die vorangegangenen Abschnitte haben die Modellierung des Generators erläutert. An dieser Stelle soll nun eine reale Messung mit den in der Simulation erzielten Ergebnissen für den Generator verglichen werden. Die Abbildung 3.26 zeigt den Vergleich der maximalen Generatorströme aus Messung und Modell. Die Validierung der umgekehrten Wirkrichtung erfolgt nicht, da hier ohnehin auf das vermessene Kennfeld aus Abbildung 3.25 zurückgegriffen wird.

Vergleich
Simulation und
Messung

Es ist zu erkennen, dass die Parameter für das Modell so gewählt wurden, dass die maximal mögliche Leistung des Generators der in den Messungen ermittelten entspricht.

3.5.3 Batterie

Batteriemodell

In dieser Arbeit wird ein Batteriemodell verwendet, das die Klemmenspannung sehr gut wiedergibt und gleichzeitig in Echtzeit (auf einem heutigen PC) gerechnet werden kann. Es ist zu großen Teilen JACKY (2007, [55]) entnommen.

Modellstruktur

Das Modell ist dreigeteilt. Es besteht nach JACKY, BARSALI und CERAULO [12, 26, 55] aus den Hauptteilen:

- Thermisches Modell,
- Lade- und Kapazitätsmodell und
- Ersatzschaltbild.

Das thermische Modell bestimmt die Elektrolytttemperatur und basiert auf Verlusten, thermischen Prozessen der Batterie und der Umgebungstemperatur. Das Lade- und Kapazitätsmodell wird zur Berechnung des Ladezustands (SOC) der Batterie verwendet. Auf der Grundlage der Ladeschlussspannung, des Batteriestroms sowie der Batterietemperatur kann die zur Verfügung stehende Kapazität errechnet werden. Das Ersatzschaltbild wird zur Bestimmung der Batterieklemmenspannung bei gegebenem Batteriestrom, Temperatur und verbleibender Kapazität verwendet [55].

Klemmenspannungsmodell

Ersatzschaltbild Klemmenspannung

Das in dem Ersatzschaltbild (Abb. 3.28) gezeigte Klemmenspannungsmodell einer Zelle besteht aus den beiden Teilen Hauptzweig und parasitärer Zweig. Der

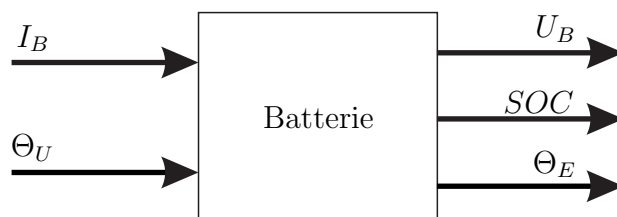


Abbildung 3.27: Blockdarstellung der Batterie

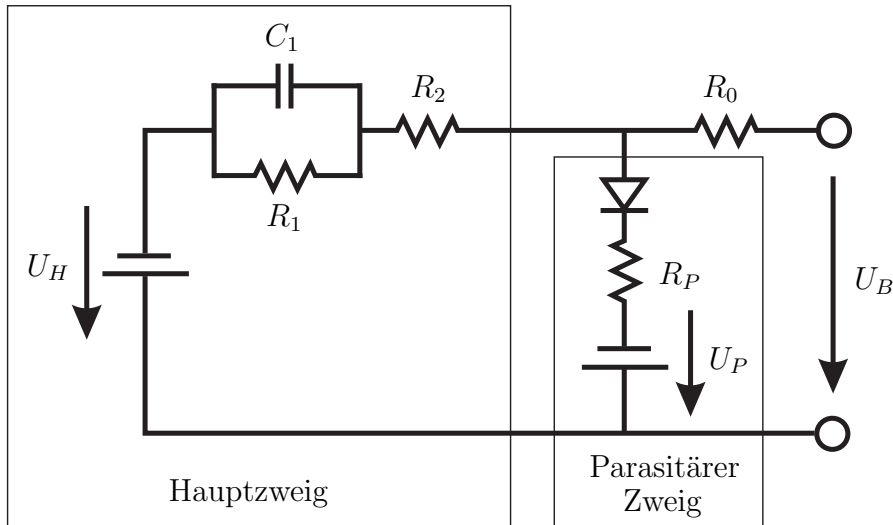


Abbildung 3.28: Ersatzschaltbild einer Blei-Säure Batterie nach JACKEY [55]

Hauptzweig gibt das Batterieverhalten beim Laden und Entladen an. Der parasitäre Zweig wird genutzt, um Verluste beim Laden der Batterie zu beschreiben. Die Leerlaufspannung der Batteriezelle U_H kann mit

$$U_{H,0} = U_{H,0}^{100} - K_E(273^\circ\text{C} - \Theta_E)(1 - SOC) \quad (3.38)$$

$U_{H,0}$	Leerlaufspannung der Batteriezelle
$U_{H,0}^{100}$	Leerlaufspannung der Batteriezelle bei voller Ladung
K_E	Konstante zur temperaturabhängigen Spannungsanpassung
Θ_E	Elektrolytttemperatur in $^\circ\text{C}$
SOC	State of Charge (Ladezustand)

berechnet werden [55]. Fließt ein Batteriestrom I_B , so wird die angegebene Zellen- Klemmen-
spannung durch verschiedene Widerstände reduziert. Der Klemmenwiderstand R_0 widerstand
ist durch die Gleichung

$$R_0 = R_0^{100}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad (3.39)$$

R_0	Klemmenwiderstand
R_0^{100}	Klemmenwiderstand bei $SOC = 1$
A_0	Widerstandskonstante

RC-Glied

gegeben [55]. Im Hauptzweig können ein RC-Glied sowie der Widerstand R_2 gesehen werden, die ebenfalls die Klemmenspannung beeinflussen. Der Widerstand R_1 kann mit

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (3.40)$$

angegeben werden [55]. Er ist damit abhängig von der Entladetiefe DOC der Batterie. Der Widerstand steigt exponentiell mit der Entladung der Batterie an. Parallel zu R_1 ist die Kapazität C_1 zu sehen. Das zeitliche Verhalten des RC-Glieds wird durch die Zeitkonstante

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad (3.41)$$

R_1	Hauptzweigwiderstand
C_1	Hauptzweigkapazität
τ_1	Zeitkonstante des Hauptzweigs

Batteriedynamik

bestimmt. Durch das RC-Glied kann die Dynamik der Batterie an die einer realen Batterie angepasst werden. Im Hauptzweig ist neben dem RC-Glied ein weiterer Widerstand R_2 in Serie angeordnet. Dieser stellt einen mit dem Ladezustand veränderlichen Widerstand dar und sorgt für einen weiteren Spannungsabfall bei entladener Batterie und steigendem Batteriestrom. Der Widerstand beeinflusst vor allem den Ladevorgang. R_2 kann gemäß

$$R_2 = R_{20} \frac{e^{A_{21}(1-SOC)}}{1 + e^{A_{22} \frac{I_m}{I_{nom}}}} \quad (3.42)$$

R_2	Hauptzweigwiderstand
$A_{21,22}$	Konstanten
I_m	Hauptzweigstrom
I_{nom}	Nominalstrom

bestimmt werden [55]. Während im Hauptzweig sowohl Lade- als auch Entladevorgänge betrachtet werden, wird der parasitäre Zweig nur bei Ladevorgängen aktiv. Er beschreibt die Verluste, die beim Laden der Batterie auftreten. Der Verluststrom ist abhängig von der anliegenden Spannung sowie der Elektrolyttemperatur. Er ist mit

Parasitärer Zweig

$$I_P = U_{PN} G_{P0} e^{\frac{U_{PN}}{U_{P0}} \frac{\tau_P s + 1}{\tau_P s + 1} + A_P (1 - \frac{\Theta_E}{\Theta_{EF}})} \quad (3.43)$$

I_P	Verluststrom durch parasitären Zweig
U_{PN}	Spannung an parasitärem Zweig
G_{P0}	Konstante in s
τ_P	Zeitkonstante des parasitären Zweigs
U_{P0}	Konstantspannung
A_P	Konstante
Θ_E	Elektrolyttemperatur in °C
Θ_{EF}	Elektrolytgefrieretemperatur in °C

gegeben [55]. Der Verluststrom (Verlustleistung) ist in den meisten Fällen sehr gering. Nur beim Laden bei sehr hohen *SOC* kommt es zu größeren Verlustströmen.

Lade- und Kapazitätsmodell

Das Lade- und Kapazitätsmodell wird zur Berechnung der in der Batterie gespeicherten Energie (*SOC*) und zur Bestimmung der Entladetiefe (*DOC*) herangezogen. Hierzu wird zunächst die Batterieladung

Batterieladung

$$Q_B(t) = Q_{B0} - \int_0^t I_m(\tau) d\tau \quad (3.44)$$

Q_B :	Batterieladung
Q_{B0} :	initiale Batterieladung

Batteriekapazität ermittelt [12, 55]. Die Kapazität² der Batterie hängt von den beiden Faktoren Batteriestrom und Elektrolyttemperatur ab, wobei anzumerken ist, dass die stromabhängige Kapazitätsänderung der Batterie nur im Entladefall berücksichtigt werden muss. Die Batteriekapazität kann wie folgt berechnet werden [12, 55]:

$$C_B(I, \Theta_E) = \frac{K_{C0} C_0^* (1 + \frac{\Theta_E}{-\Theta_{EF}})^{K_{C1}}}{1 + (K_{C0} - 1) (\frac{I}{I^*})^{K_{C2}}} \quad (3.45)$$

C_B	Batteriekapazität im Betrieb
$K_{C0,1,2}$	Konstante (in späterer Parameteridentifikation zu bestimmen)
C_0^*	Leerlaufkapazität bei 0°C in As
Θ_E	Elektrolyttemperatur in °C
Θ_{EF}	Elektrolytgefrieretemperatur in °C

SOC Aus der zur Verfügung stehenden maximalen Kapazität $C(I, \Theta_E)$ (Gl. 3.45) und der Batterieladung Q_B (Gl. 3.44) kann der Ladezustand *SOC* der Batterie bestimmt werden [55]:

$$SOC = \frac{Q_B}{C_B(0, \Theta_E)}. \quad (3.46)$$

DOC Während der *SOC* für die Leerlaufkapazität (Kapazität bei keiner Belastung) ermittelt wird, kann bei einem - die Batterie durchschnittlich belastenden - Strom die Batterieladetiefe *DOC* (Depth Of Charge) berechnet werden [55]:

$$DOC = \frac{Q_B}{C_B(I_{avg}, \Theta_E)} \text{ mit} \quad (3.47)$$

$$I_{avg} = \frac{I_m}{\tau_1 s + 1}.$$

²Im elektrotechnischen Sinn handelt es sich hier eigentlich um die maximale Ladung der Batterie. Es hat sich in der Batterietechnik allerdings der Term Batteriekapazität eingebürgert.

Thermisches Modell

Der letzte Teil des Batteriemodells wird durch das thermische Modell gebildet. Die vorangegangenen Teilmodelle beschreiben den Ladezustand und die Klemmenspannung in Abhängigkeit der Elektrolytttemperatur. Diese ist zum einen abhängig von der Umgebungstemperatur und ändert sich zum anderen aufgrund der internen Verluste [55]:

$$\Theta(t) = \Theta_{init} + \int_0^t \frac{P_s - \frac{(\Theta_E - \Theta_U)}{R_\Theta}}{C_\Theta} d\tau. \quad (3.48)$$

- Θ_U : Umgebungstemperatur in °C
- Θ_{init} : Anfangstemperatur in °C
- P_s : Leistungsverluste über R_0 und R_P in W
- C_Θ : thermische Kapazität in J
- R_Θ : thermischer Widerstand in °C/W

Parameteridentifikation und Validierung des Batteriemodells

Das Batteriemodell kann entsprechend geeigneter Messungen parametrisiert werden. Dabei können sowohl automatische Parameteridentifikationsmethoden auf der Basis von Optimierungsalgorithmen verwendet werden, als auch händisch vorgegangen werden. Aufgrund der Vielzahl von Parametern im Batteriemodell ist es sinnvoll, nur einige Parameter als variationsfähig anzunehmen und alle restlichen Parameter fest zu definieren. Dies garantiert ein physikalisch sinnvolles Ergebnis und beschleunigt den Vorgang erheblich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Klemmenspannungsverhalten der Batterie optimiert. Dabei wird der Zusammenhang von Strom und Spannung an den Batterieklemmen angepasst.

3.6 Energiemanagementalgorithmus

Das an dieser Stelle diskutierte Energiemanagementsystem ist ein System, das als Verbrauchermanagementsystem kategorisiert werden kann. Abhängig von Entscheidungsregeln werden verschiedene Verbraucher bevorzugter mit elektrischer Energie versorgt als andere. Grundlage eines jeden solchen Systems ist eine Festlegung der

Relevanz einzelner Verbraucher. Dabei können oft Forderungen, die den direkten Kundennutzen (Komfort) betreffen mit solchen aus Sicherheitsüberlegungen kollidieren.

3.6.1 Optimales Energiemanagement

Optimierungsaufgabe

Das Energiemanagement als Optimierungsaufgabe zu definieren ist sehr naheliegend. Die Verwendung von Standardoptimierern wie z. B. einem genetischen Algorithmus, einer Intervallanalyse oder auch einem aus der Klasse der gradientenbasierten Optimierer bedarf allerdings der Definition geeigneter Nutzenfunktionen. Der Nutzen hängt neben den äußeren Bedingungen und dem aktuellen Fahrerwunsch nach Gleichung 3.49 vor allem von der zugeführten Leistung ab. Dabei soll der Gesamtnutzen N_{Gesamt} des Bordnetzes für den Betrieb des Kfz maximiert werden. Dieser ergibt sich aus der Summe der Nutzen aller vorhandenen Einzelgeräte im Bordnetz

$$N_{Gesamt} = \sum_{i=1}^n N_{Verbraucher,i} \text{ mit} \quad (3.49)$$

$$N_{Verbraucher,i} = f(P_i, W_{Fahrer}, \mathbf{x}_V, \mathbf{u}_V).$$

N_{Gesamt}	Gesamtnutzen aller Verbraucher im Bordnetz
$N_{Verbraucher}$	Nutzen eines Verbrauchers
n	Anzahl aller Verbraucher im Bordnetz
P_i	aktuell verfügbare Verbraucherleistung des i-ten Verbrauchers
W_{Fahrer}	Fahrerwunsch
\mathbf{x}_V	Zustand des Gesamtfahrzeugs
\mathbf{u}_V	Eingänge in das System Fahrzeug

Nebenbedingung

Diese Optimierung ist unter der Bedingung auszuführen, dass nur die maximal zur Verfügung stehende Leistung von Generator und Batterie auf die Verbraucher verteilt werden kann. Damit ergibt sich die Bedingung

$$\sum_{i=1}^n P_i \leq P_{max} = P_G + P_B. \quad (3.50)$$

Zu unterscheiden sind die verschiedenen Verbrauchertypen:

- diskrete Verbraucher mit nur einer Einschaltstellung,
- diskrete Verbraucher mit mehreren Schaltstufen und
- kontinuierliche Verbraucher.

Um eine Optimierung der Leistungsverteilung durchführen zu können, müssen für alle Verbraucher, welche in das Energiemanagement eingebunden werden sollen, Nutzenfunktionen aufgestellt werden. Dabei können die diskreten Verbraucher durch eine oder die Kombination mehrerer Sprungfunktionen abgebildet werden. Im einfachsten Fall kann für den Nutzen eines diskreten Verbrauchers angenommen werden, dass er keinerlei Nutzen hat, solange die ihm zugeführte Leistung kleiner als seine Nominalleistung ist. Erhält er allerdings diese Leistung oder mehr steigt der Nutzen unmittelbar auf einen konstanten Wert.

Nutzenfunktionen

$$N_i = \begin{cases} 0 & \text{für } P_i < P_{i,nom} \\ N_{i,max} & \text{sonst.} \end{cases} \quad (3.51)$$

Der Nutzen eines kontinuierlichen Verbrauchers nimmt in der Regel mit der ihm zur Verfügung gestellten Leistung zu. Der Nutzenzuwachs kann allerdings nicht unbegrenzt fortgeführt werden. Eine weitere Erhöhung der zugeführten Leistung kann in wenigen Fällen sogar zu einer Minderung des Verbrauchernutzens führen. Die Nutzenfunktion für die einzelnen Verbraucher muss nach GRAF [42] ein Maximum haben. Für das Energiemanagement ist es allerdings nicht unbedingt notwendig, eine kontinuierliche Nutzenfunktion für die kontinuierlichen Verbraucher zu formulieren. So können z.B. auch abschnittsweise lineare Nutzenfunktionen sehr brauchbare Ergebnisse liefern. Wird der jeweilige Verbrauchernutzen auf die hierzu benötigte Leistung bezogen, so ergibt sich der spezifische Nutzen des Verbrauchers

$$N_{i,spez} = \frac{N_i}{P_i}, \quad (3.52)$$

welcher besonders geeignet für das elektrische Energiemanagement erscheint [97].

Zur Lösung eines so gestellten Optimierungsproblems stehen grundsätzlich verschiedene Standardverfahren zur Verfügung. Diese können z.B. bei RAO [79] nachgelesen werden. Die folgenden Abschnitte geben einen sehr verkürzten Einblick in verschiedene Optimierungsverfahren und bewerten die Eignung verschiedener Optimierer hinsichtlich eines Einsatzes im Bordnetzmanagement.

Gradienten- basierte Optimierung

Die gradientenbasierte Optimierung basiert darauf, dass ein Minimum/Maximum einer Funktion (hier Nutzenfunktion) dadurch gefunden werden kann, dass in Richtung des Gradienten gesucht wird. Bei vielen Verbrauchern ist die zuführbare Leistung allerdings mehr oder weniger diskret. Wird der Verbraucher aktiv, so wird eine bestimmte Leistung entsprechend Tabelle 2.4 benötigt und der Verbrauchernutzen steigt von Null auf ein entsprechendes Maß an. Ein solcher diskreter Nutzen eines Verbrauchers schließt die Verwendung gradientenbasierter Optimierer aus [79].

Genetische Algorithmen

Der genetische Algorithmus stellt eine Alternative zu diesen gradientenbasierten Optimierungsverfahren dar. Hier wird versucht, ein globales Optimum mittels der Prinzipien einer genetischen Entwicklung zu finden. Ausgehend von einer Startpopulation, bestehend aus einzelnen Individuen, werden Generationen von neuen Individuen gebildet. Dies geschieht durch Vererbung von Eigenschaften und einer Mutationsrate (Zufallseinfluss). Diejenigen Individuen, welche am besten an ein gestelltes Problem (hier Gesamtnutzen maximieren) angepasst sind, überleben, während schlechter angepasste Individuen aussterben. Damit entspricht diese Art der Optimierung der natürlichen Auslese, wie sie in der Evolutionslehre nach Darwin zu finden ist. Sprünge in der Nutzendefinition sind für diese Art von Optimierern nicht hinderlich, da die Mutationsrate (Zufallseinfluss) auch ein Optimum über einen solchen Sprung hinweg finden kann. Für eine Anwendung im Kfz mit der Vielzahl der zu verwaltenden Verbraucher kann das Optimum jedoch nicht in einer adäquaten Zeit ermittelt werden [79].

Intervall- arithmetik

Die Intervallanalyse garantiert das Auffinden des globalen Maximums. Hierzu wird zunächst das Startintervall geteilt. Beide Teile können danach auf das Auftreten des Maximums hin überprüft werden. Der Vorgang des Teilens und Prüfens wird nun solange wiederholt, bis ein sehr kleines Intervall entsteht, in welchem das gesuchte Maximum garantiert liegt. Eine genauere Beschreibung ist u. a. bei HANSEN [46] zu finden. Problematisch ist hier allerdings ebenfalls die Rechenzeit, welche eine Auswertung für den Betrieb im Kfz unbrauchbar macht. Zusätzlich können Nebenbedingungen, wie sie z. B. durch die maximal zur Verfügung stehende Energie gegeben sind, nur bedingt berücksichtigt werden.

Klassische Optimierer ohne Erfolgsaussicht

Diese klassischen Optimierungsverfahren können somit aus verschiedenen Gründen keine Anwendung im Energiemanagement eines Kfz finden. Wie bereits in Kapitel 2.4 erläutert, existieren zur Verteilung der Energie im Kfz bereits verschiedene

Ansätze. Streng genommen wird in diesen erläuterten Ansätzen keine Nutzenoptimierung durchgeführt, da abhängig vom festgelegten Nutzen immer zunächst die wichtigsten Verbraucher den Zuschlag erhalten. Ein etwaiger Mehrnutzen durch den Betrieb von zwei niedriger eingestuftem Verbrauchern gegenüber einem wichtigen bleibt damit unberücksichtigt. In diesem Abschnitt wird daher zunächst das Vorgehen auf der Basis der Gesamtnutzenoptimierung diskutiert. Da sich die hierzu verwendeten Optimierungsalgorithmen nur bedingt im benötigten Regeltakt umsetzen lassen, wird für die Simulationen in Kapitel 4 und 6 auf den Ansatz von SCHMIDT, erweitert um leichte Modifikationen und Anleihen aus HEINTEL und BÜCHNER, zurückgegriffen. Anders als z. B. von BÜCHNER vorgesehen wird das Management nicht dazu verwendet über einen Fahrzyklus ein Fahrzeug energieoptimal zu betreiben, sondern um die kurzfristige Funktionsfähigkeit von Schlüsselkomponenten zu sichern.

Erweiterung
bestehender
Ansätze

3.6.2 Dynamische Prioritäten mit dezentraler Notfallschaltung

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Energiemanagementsystem basiert auf dem weit entwickelten Ansatz von SCHMIDT aus [89]. Um allerdings bei sehr schnellen Schwankungen in der Leistungsanfrage direkt reagieren zu können, wird es manchen Verbrauchern ermöglicht, direkt andere (unwichtigere) Verbraucher abzuschalten ohne vorher den Weg über das zentrale Energiemanagement zu wählen [97]. Dieser Vorgang ist die sogenannte Notfallschaltung und ist vielleicht mit einem Reflex des menschlichen Körpers zu vergleichen. Während Muskeln normalerweise zentral vom Gehirn gesteuert werden, nachdem hier die vorliegenden Informationen bewertet worden sind, wird im Falle eines Reflexes direkt eine Handlung ausgeübt ohne vorher das Gehirn eingebunden zu haben. Es handelt sich demnach um ein dezentrales Abschalten eines Verbrauchers, wie es z. B. im agentenorientierten Ansatz nach HEINTEL gefunden werden kann.

Basisstrategie

Die Basisstrategie des hier vorgestellten EEM arbeitet auf der Grundlage von Prioritäten. Jedem Verbraucher wird entsprechend des zuvor definierten spezifischen Verbrauchernutzens eine Priorität zugeordnet³. Die Diskretisierung kontinuierlicher in mehrere diskrete Verbraucher erlaubt es den Prioritätsgedanken auch für

Priorisierung

³Bei mehrstufigen Verbrauchern sollte die Priorität pro Stufe gewählt werden.

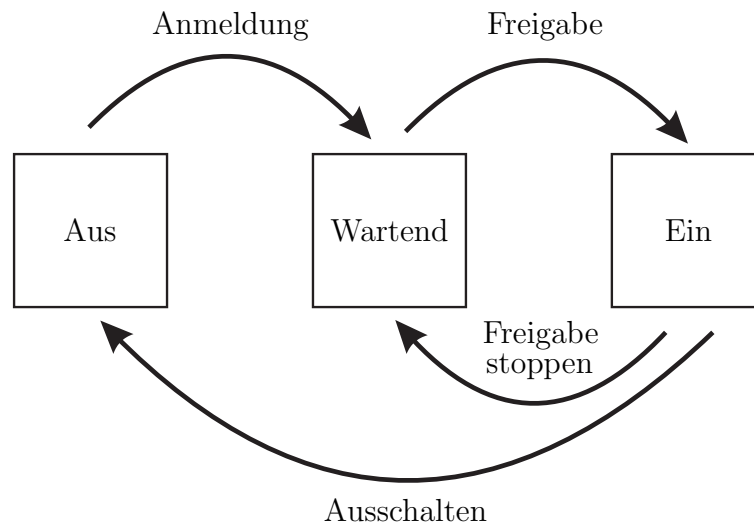


Abbildung 3.29: Status der Verbraucher im Bordnetz

solche Verbraucher anzuwenden. Die Prioritäten eines Verbrauchers können während des Betriebs variieren und bieten so die Möglichkeit der Anpassung an Umweltbedingungen oder den aktuellen Bordnetzzustand [97].

Einfache Grundfunktion

Die Grundfunktion des EEM ist danach zunächst sehr einfach. Ein Verbraucher, der eingeschaltet wird, wartet zunächst auf eine Freigabe durch das EEM bevor er wirklich Leistung aus dem Bordnetz erhält. Dieses Vorgehen wird in Abbildung 3.29 verdeutlicht.

Dem eingeschalteten Verbraucher wird erst dann die geforderte Leistung zugeteilt, wenn er durch die veröffentlichte Priorität die Freigabe erhält am Bordnetzbetrieb teilzunehmen. Genauso kann die Freigabe eines Verbrauchers wieder gestoppt werden, falls die Priorität des Verbrauchers nicht mehr ausreicht, um weiterhin versorgt zu werden.

Schaltstufenbestimmung

Leistungs- verteilung

Die Schaltstufenermittlung erfolgt auf der Basis der maximal verteilbaren Leistung P_{max} . In der Realität ist es allerdings nur schwer möglich diese exakt zu bestimmen. Nicht angemeldete Komponenten oder Verbraucher mit kontinuierlich veränderlicher Leistung reduzieren die real zur Verfügung stehende Leistung im Vergleich zu der vom Energiemanagement zuvor bekannten. Der aktuelle Leistungsbedarf P_{akt} im Bordnetz wird muss daher zu Beginn der Leistungszuweisung ermittelt wer-

den. Die Differenz dieser wirklich entnommen Leistung zur vom Energiemanagement zuletzt verteilten Leistung $P_{EEM,verteilt}$

$$P_{unb} = P_{akt} - P_{EEM,verteilt} \quad (3.53)$$

entspricht dann der Leistung, die an unbekannte Verbraucher abgegeben wird [97]. Hiermit kann der Wert für die maximale vom Managementsystem verteilbare Leistung korrigiert werden

$$P_{max,EEM} = P_{max} - P_{unb}. \quad (3.54)$$

Die Verbraucher werden, entsprechend ihrer zugeordneten Prioritäten, der Größe nach absteigend sortiert. Dabei wird die Priorität eines Verbrauchers aus dem relativen Nutzen gebildet, den er bei der Zuteilung der geforderten Leistung erhält, also dem Quotienten aus Nutzen zur benötigten Leistung. So ist gewährleistet, dass das Management auf der Basis der Prioritäten eine wirkliche Optimierung der Leistungsverteilung bewirkt. Die genaue Beschreibung, wie die einzelnen Prioritäten gebildet werden, ist in SÖHNCHEN [97] nachzulesen. Nach SÖHNCHEN können die Leistungsanforderungen in der so sortierten Tabelle von oben beginnend summiert werden. Die Summenbildung endet, wenn

Sortieren nach
Prioritäten

- die Summe der Verbraucherleistungen die verfügbare Leistung $P_{max,EEM}$ übersteigt oder
- alle Elemente summiert sind (alle Verbraucher die geforderte Leistung erhalten), ohne dass die maximale Leistung erreicht wird.

Im ersten Fall kann die Priorität als Schaltschwelle an alle Verbraucher ausgegeben werden, bei der die verfügbare Leistung $P_{max,EEM}$ überschritten wurde.

Im zweiten Fall muss keine künstliche Schaltschwelle festgelegt werden. Die Schaltschwelle 0 wird veröffentlicht und alle Verbraucher erhalten die geforderte Leistung.

Notfallschaltung

Im Bordnetz müssen gemessene Strom- und Spannungsverläufe vor der Nutzung durch das EEM gefiltert werden. Zudem ist eine Datenübertragung der Messwerte an das EEM und dann zurück an die einzelnen Verbraucher notwendig. Dadurch

Hohe Leistungs-
gradienten
kritisch

bedingt kommt es bei großen Leistungsgradienten zu zeitlichen Verzögerungen zwischen auftretenden Leistungsengpässen und der Reaktion des EEM. Die oben beschriebene Basisstrategie des EEM kann daher lediglich für einen mittleren bis großen Zeithorizont gute Ergebnisse liefern. Leistungsspitzen von Hochstromverbrauchern, die sehr kurzfristig auftreten und große Leistungsgradienten aufweisen, können mit der Basisstrategie nicht abgefangen werden.

Dies ist gerade für innovative Hochstromverbraucher moderner Kfz wie z. B. der EPS eine Herausforderung. Neben der Problematik, dass es zu zeitlichen Verzögerungen im Ablauf des EEM kommt, ist der Spitzenleistungsbedarf eines Systems wie der EPS zunächst unbekannt. Da Hochstromverbraucher wie die EPS sicherheitsrelevant sind und ein Leistungsengpass u. U. direkt vom Fahrer wahrnehmbar ist, muss für solche Systeme eine andere Art des EEM greifen.

Direkte Leistungsverteilung

Kommt es während der Fahrt zu einer hohen Leistungsanforderung einer Sicherheitskomponenten (z. B. der EPS bei einem Ausweichmanöver), welche einen sehr hohen spezifischen Nutzen hat, kann die Basisstrategie des EEM die volle Funktion des sicherheitskritischen Verbrauchers nicht gewährleisten. Es wird die Notfallschaltung aktiviert. Dazu muss der beschriebene Anmeldeprozess entsprechend der zuvor erläuterten Basisstrategie beendet werden. Es wird sofort ein fester (hoher) Prioritätswert veröffentlicht, was zum Abschalten von einer Vielzahl von Verbrauchern führt. Dieses Vorgehen bedingt eine kurzzeitige Deaktivierung von genügend Verbrauchern, entspricht allerdings in keinsten Weise der Idee einer optimierten Energieverteilung. Es wird toleriert, dass evtl. weit mehr Verbraucher als nötig abgeschaltet werden. Für die sicherheitsrelevanten Verbraucher wird so allerdings eine bestmögliche Versorgung ermöglicht [97].

Die Notfallschaltung kann schon vor dem Auftreten des eigentlichen Leistungsengpasses eingeleitet werden. Es können z. B. folgende Informationen verwendet werden [97]:

- Lenkwinkelgeschwindigkeit,
- Time to Collision aus Notbremssystemen und die
- Wahrscheinlichkeit von Ausweichtrajektoren und deren Leistungsbedarf, sofern diese aus anderen Systemen bekannt sind.

KAPITEL 4

Simulation der Wechselwirkung von Fahrdynamik und Bordnetz

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse einer Offline Simulation unter Verwendung der in Kapitel 3 dargestellten Modelle dokumentiert. Von besonderem Interesse ist die Reaktion des Bordnetzes bei verschiedenen Testmanövern. Die Kopplung des Bordnetzes und des Fahrers durch die elektrische Servolenkung wird genau analysiert.

4.1 Definition geeigneter Testmanöver

Zur Vergleichbarkeit von Simulation und realen Fahrversuchen müssen geeignete Testmannöver definiert werden. Dabei soll ein möglichst breites Spektrum verschiedener Fahrsituationen mit möglichst wenigen Tests abdeckbar sein.

Vergleichbarkeit

Messungen der elektrischen Leistung der EPS haben gezeigt, dass hier vor allem zwei Szenarien von Interesse sind. Die größte Belastung des Bordnetzes durch die EPS kann bei einem Drehen der Räder im Stand mit gebremsten Vorderrädern beobachtet werden. Diese Situation, wie sie z.B. bei langsamen Parkiervorgängen auftreten kann, muss von den Testmanövern berücksichtigt werden. Die weiteren

Lenken im Stand

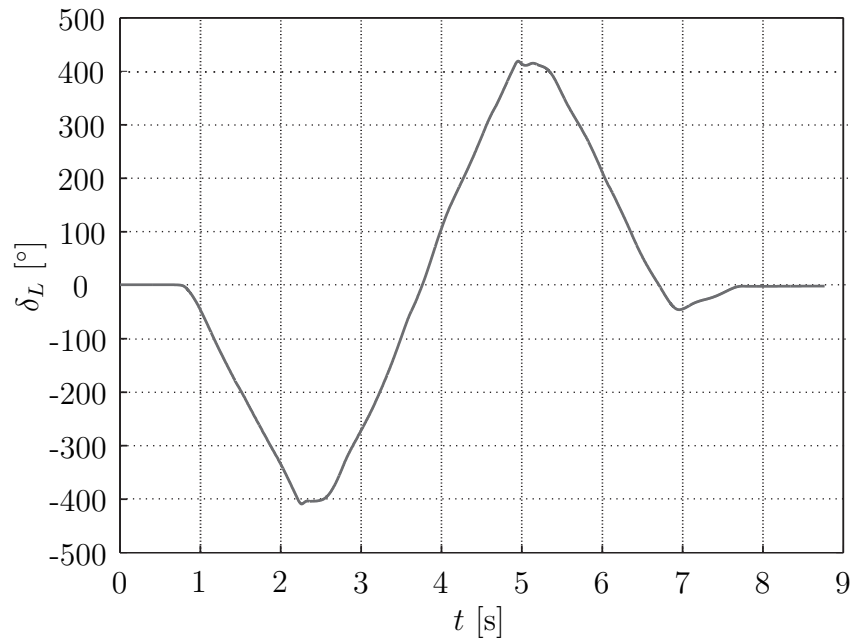


Abbildung 4.1: Gemessener Lenkwinkelverlauf beim Lenken im Stand

elektrischen Verbraucher können in diesem Szenario als Grundlast entsprechend eines definierten Lastprofils abgedeckt werden.

Spurwechsel

Weiterhin interessant für die gekoppelte Betrachtung von Fahrzeugdynamik und Bordnetz sind Betriebszustände in denen mehrere elektromechanische Verbraucher aktiv sind. Im Rahmen dieser Arbeit sind das die EPS und das ESC. Ein gut reproduzierbares Manöver, in dem dies der Fall ist, ist der doppelte Spurwechsel.

Die Wahl dieser beiden Testmanöver stellt sicher, dass langsame parkierähnliche Fahrzustände genauso wie schnelle Manöver, wie sie beim Notausweichen vorkommen, berücksichtigt werden. Die folgenden Abschnitte erläutern kurz die gewählten Testmanöver mit den dazugehörigen Lastprofilen der elektrischen Verbraucher.

4.1.1 Durchlenken im Stand

Worst-Case

Das Lenken im Stand mit gebremsten Vorderrädern stellt den worst-case im Bezug auf die Leistung der EPS dar. Das Manöver kann von einem Lenkroboter durchgeführt werden, was eine sehr gute Wiederholbarkeit garantiert. Ein entsprechender Lenkwinkelverlauf ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

Testablauf

Der gesamte Test hat eine Dauer von nur wenigen Sekunden. Dies macht ihn zu einem sehr gut verwendbaren Test auch für anspruchsvolle Simulationen. Der Lenkwinkel wird annähernd sinusförmig vom Roboter bis nahe zum Anschlag auf

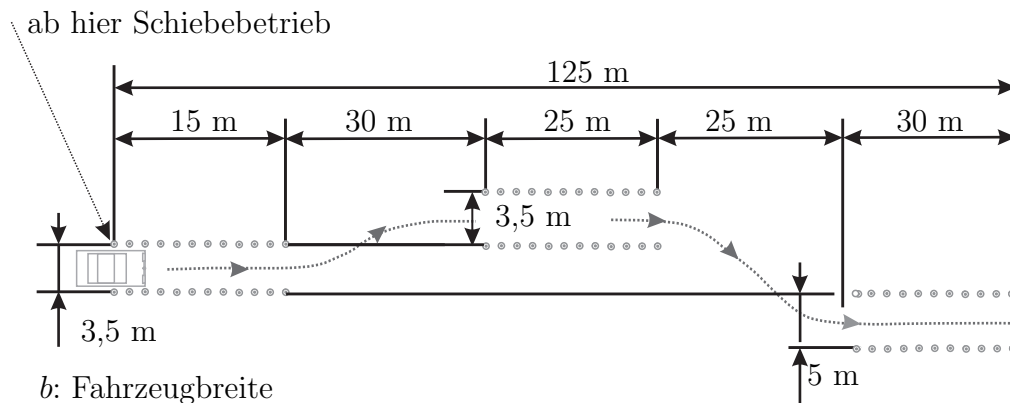


Abbildung 4.2: Spurwechsel abgeleitet aus ISO 3888-2 [3]

über 400° zu beiden Seiten gelenkt. Dabei wird eine Lenkwinkelgeschwindigkeit von ca. $320 \frac{^\circ}{s}$ erreicht.

4.1.2 Doppelter Spurwechsel

Der doppelte Spurwechsel wurde entwickelt, um die Fahrdynamik eines Fahrzeugs zu untersuchen. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Manöver ist abgeleitet vom genormten Spurwechselmanöver und in Abbildung 4.2 dargestellt.

Untersuchung
Fahrdynamik

Die Ähnlichkeit zum genormten Manöver ermöglicht eine sehr gute Transparenz der erzielten Ergebnisse. Im Vergleich zum genormten Test wurden die Abstände der Gassen sowie deren Breite etwas vergrößert. Dies ermöglicht auch im Fahrsimulator ungeübten Fahrern ein „erfolgreiches“ Manöver zu fahren. Um dennoch eine hohe Lenkgeschwindigkeit zu erzwingen, so wie es auch im Normtest benötigt wird, ist die dritte Gasse weiter nach rechts verlegt worden. Wie anfängliche Tests gezeigt haben, erfordern die Testbedingungen im Simulator (vgl. Kap. 5) die erläuterten Änderungen.

Testablauf

Das Fahrzeug nähert sich während des Tests der ersten Pilonengasse mit einer Geschwindigkeit von $80 \frac{km}{h}$. Ab der in der Zeichnung markierten Stelle wird dann in den Schiebetrieb übergegangen. Die Aufgabe für den Fahrer besteht darin, das Fahrzeug durch die Pilonengassen zu lenken. Der doppelte Spurwechsel stellt ein hochdynamisches Manöver dar. Neben einer hohen Leistungsanforderung an die elektrische Servolenkung werden unter Umständen weitere Systeme wie das ESC aktiv. Es können weitere elektrische Hochstromverbraucher wie z.B. aktive Fahrwerke oder auch eine Hinterachslenkung in die Untersuchungen integriert werden.

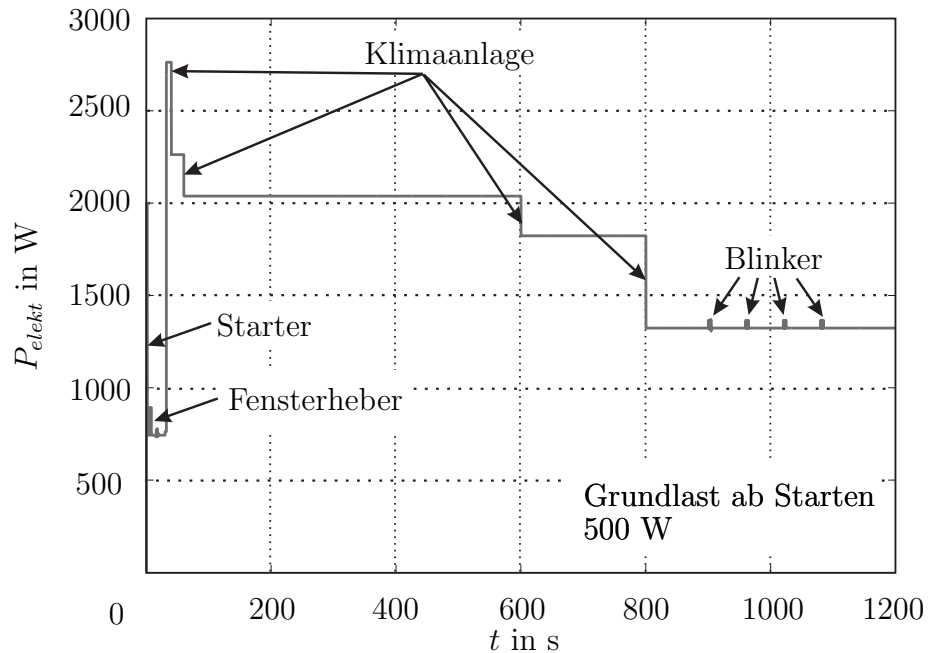


Abbildung 4.3: Leistungsprofil der Verbraucher über einen NEFZ im Sommer nach Werten aus [13]

Der doppelte Spurwechsel deckt den Bereich hochdynamischer Manöver (Notfallmanöver) im Rahmen dieser Untersuchungen ab. Solche Fahrsituationen treten bei normaler Nutzung eines Kfz nur sehr selten auf. Sie sind dann aber immer potentielle Gefahrensituationen und bedürfen daher einer näheren Analyse.

4.1.3 Konditionierung des Bordnetzmodells

Grundlastprofil

Neben den fahrdynamischen Manövern sind vor allem die elektrischen Lastprofile im Hinblick auf die Untersuchung des Bordnetzes und eines Energiemanagements von entscheidender Bedeutung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht alle denkbaren Lastprofile sinnvoll sind. Es muss Wert darauf gelegt werden, zu welchem Zeitpunkt einer Fahrt welche Lasten auftreten und wie die äußeren Witterungsverhältnisse sich auf diese auswirken können. Im Rahmen dieser Arbeit werden elektrische Lastprofile verwendet, die auf eine Nutzung des Fahrzeugs im NEFZ¹ entsprechen.

¹Der sogenannte „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) ist eingeführt worden, um eine Vergleichbarkeit des Kraftstoffverbrauchs sowie den damit zusammenhängenden Emissionen zwischen verschiedenen Fahrzeugen zu ermöglichen [5]. Damit bietet er die Möglichkeit einen standardisierten Fahrzyklus für verschiedene Tests zu verwenden. Aufgrund seines synthetischen Aufbaus ist er allerdings nicht immer verwendbar, um das Fahrzeugverhalten bei realem Gebrauch zu untersuchen. Insbesondere für die momentan viel diskutierten Elektrofahrzeuge werden neue Testzyklen entwickelt werden müssen [63,91].

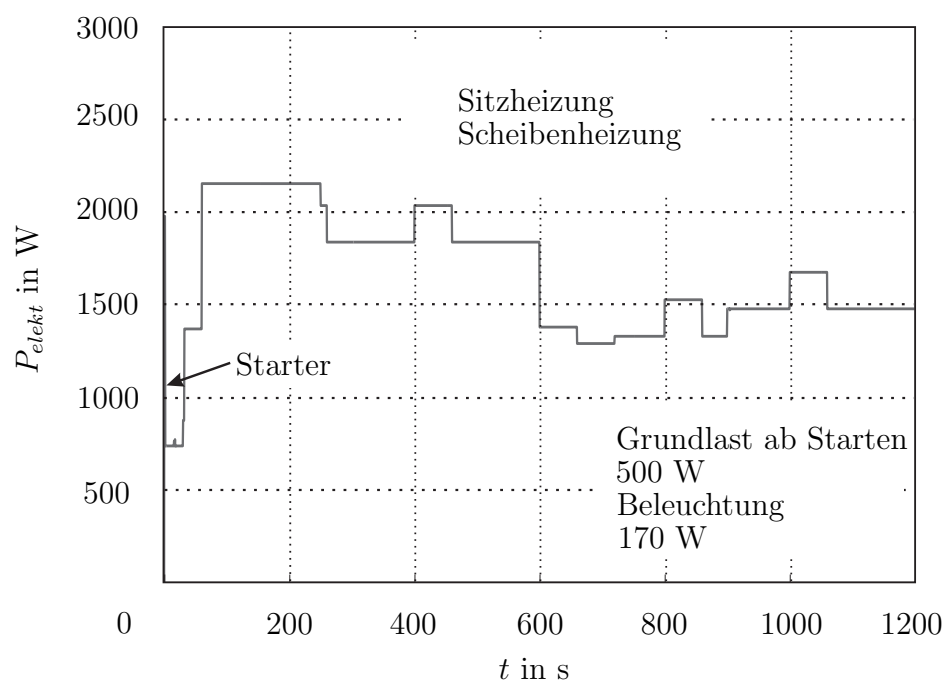


Abbildung 4.4: Leistungsprofil der Verbraucher über einen NEFZ im Winter nach Werten aus [13]

Sommerbetrieb

Der Sommerbetrieb eines Fahrzeugs ist vor allem dadurch gekennzeichnet, dass diverse Kühlsysteme aktiviert werden. Abbildung 4.3 zeigt ein Beispiel für ein elektrisches Lastprofil passend zum NEFZ.

Eine elektrische Klimaanlage ist im Sommer der größte Verbraucher im elektrischen Bordnetz. In den ersten Minuten der Fahrt, wenn das Fahrzeug von hohen Temperaturen schnell heruntergekühlt werden soll, werden bis zu 2,5 kW von ihr aufgenommen. Das hier gezeigte Leistungsprofil berücksichtigt neben der Klimaanlage eine Grundlast von 500 W sowie das Verwenden der Blinker. Diese sind für Energiemanagementsysteme interessant, da sie eine pulsierende Spannungsänderung im Bordnetz verursachen.

Klimaanlage dominiert

Winterbetrieb

Im Winterbetrieb werden grundsätzlich etwas andere elektrische Verbraucher benötigt als im Sommer. Ein beispielhaftes Leistungsprofil über eine Strecke des NEFZ kann in Abbildung 4.4 gesehen werden.

Die Leistungsaufnahme im Winterbetrieb wird durch elektrische Heizsysteme domi-

Heizsysteme dominieren

niert. Zu nennen sind hier vor allem die elektrischen Scheiben- und Sitzheizungen, die eine hohe Leistung fordern. Bei modernen Dieselfahrzeugen würde in den ersten Minuten eine zusätzliche elektrische Heizung verwendet werden, die hier im Leistungsprofil nicht berücksichtigt ist. Neben den Heizsystemen ist für den Winterbetrieb die Beleuchtung als Grundlast berücksichtigt worden.

4.2 Bordnetzbelastung ohne Energiemanagement

Leistung nicht
ausreichend

Schon einfache Versuche mit modernen Fahrzeugen zeigen, dass bei zu starker Beanspruchung des Bordnetzes die vom Fahrer wahrgenommenen Systeme nicht mehr ausreichend mit elektrischer Leistung versorgt werden können. Im Falle der EPS ist dies, wie bereits erwähnt, nicht nur störend sondern zudem eine potentielle Risikoquelle.

Fahrer-
handmoment

Simulationen unter Verwendung der oben beschriebenen Lastszenarien zeigen deutlich den Zusammenhang von Bordnetzlast und elektrischer Servolenkung. Dafür wird entsprechend der Lastprofile für den Sommer- oder Winterbetrieb das Bordnetz belastet. Die hierfür verwendeten Verbraucher sind als ohmsche Lasten modelliert und können zu- oder abgeschaltet werden. Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf des Fahrerhandmoments beim Durchlenken im Stand und einer Leistungsanforderung an das Bordnetz entsprechend dem Sommerzyklus bei 200 s. Die Stelle bei 200 s ist zum einen durch eine sehr hohe benötigte Leistung gekennzeichnet. Zum anderen erscheint bei einer typischen Autofahrt ein Lenken im Stand (oder bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten) vor allem im ersten Teil des NEFZ (Stadtzyklus) als sinnvoll. Somit wird auch die Generatordrehzahl passend zur Geschwindigkeit (Gang) entsprechend des NEFZ gewählt.

Starker Anstieg
Handmoment

Wie anhand der Abbildung deutlich zu sehen ist, muss der Fahrer zunächst lediglich bis zu 3 Nm Handmoment aufbringen. Dies entspricht einer komfortablen leichtgängigen Lenkung. Nach ca. 6 s des Lenkmanövers ist jedoch eine deutliche Erhöhung des benötigten Lenkmoments zu beobachten. Eine solche schlagartige Erhöhung des Handmoments ist bei einem parkierähnlichen Manöver im starken Maße störend für den Fahrer. Sie ist deutlich merkbar und stellt damit einen klaren Komfortverlust bei langsamer Fahrt dar.

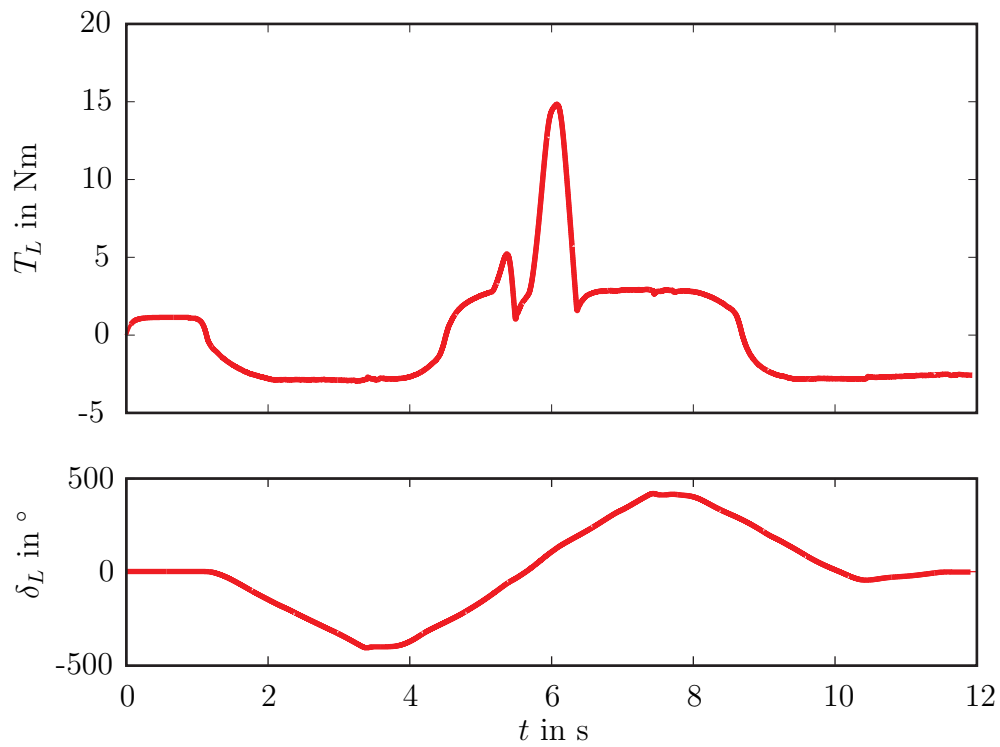


Abbildung 4.5: Handmoment beim Durchlenken im Stand (oben); Lenkradwinkel (unten)

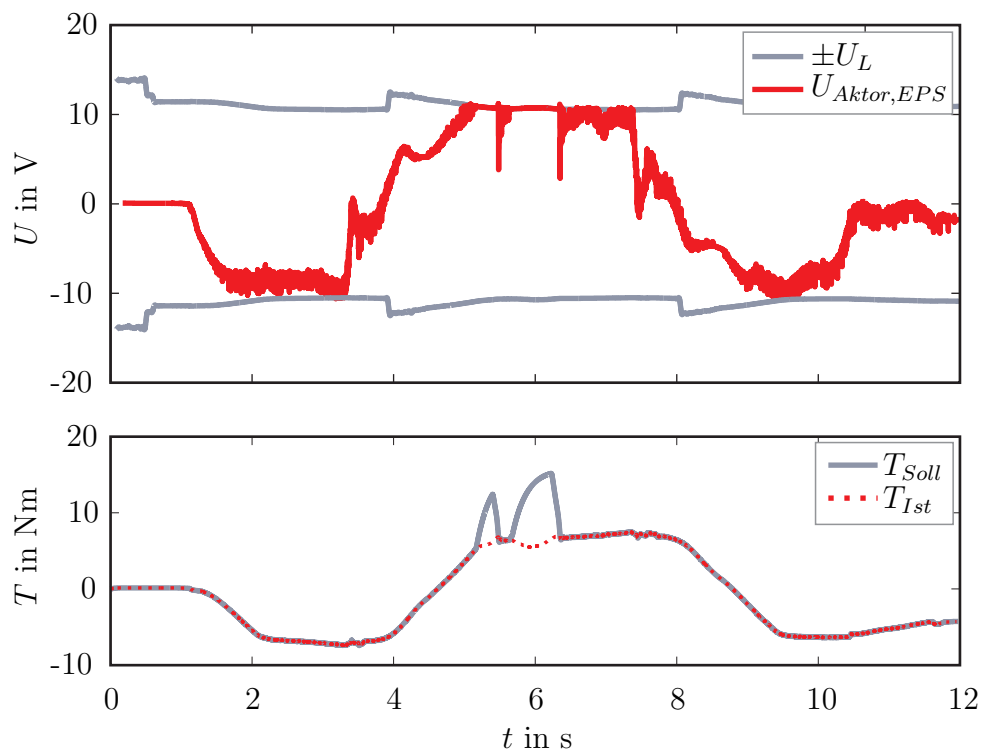


Abbildung 4.6: Regelspannung am EPS-Aktor (oben); gefordertes und aktuelles Aktormoment (unten)

Der beobachtete starke Anstieg kann nur durch eine Leistungsbegrenzung des elektrischen Aktors erklärt werden, wie in Abbildung 4.6 anhand des Vergleichs zwischen gefordertem und erreichtem Unterstützungsmoment der EPS zu sehen ist.

Zu geringe
Unterstützung

Zu Beginn des Manövers folgt das Unterstützungsmoment der EPS der Sollvorgabe. An der Stelle der Handmomentüberhöhung ist zu erkennen, dass dies nicht mehr der Fall ist. Obwohl der elektrische Aktor so ausgelegt ist, dass er grundsätzlich in der Lage ist, die während des Manövers geforderte Unterstützung aufzubringen, kann dies hier nicht geleistet werden.

Bordnetzspannung
zu gering für
geforderte
Unterstützung

Die zu geringe Unterstützung resultiert letztlich aus der eingangsseitigen Beschränkung der Aktorspannung auf die momentan anliegende Bordnetzspannung. Dies ist in Abbildung 4.6 (oben) gut zu sehen. Die Bordnetzspannung sinkt während des Manövers auf etwas über 10 V ab. Der Regler kann nun maximal diese Spannung an den Aktor der EPS anlegen. Die Regelspannung ist somit begrenzt. Im gezeigten Manöver reicht diese Spannung nicht mehr aus, um das geforderte Moment zu erzeugen.

Rückinduktion
kritisch

Selbst bei einer hohen Bordnetzspannung von bis zu 14 V kann es bei sehr schnellen Lenkvorgängen durch die Rückinduktion der Ankerspannung dazu kommen, dass der Aktor die geforderte Unterstützung nicht liefern kann. Bei stark belastetem Bordnetz (wie in dem hier betrachteten Szenario) ist durch die Bordnetzlast dessen Spannung bereits abgesenkt, so dass auch beim langsamen Lenken das geforderte Unterstützungsmoment nicht mehr geliefert werden kann.

Das dargestellte Manöver zeigt die Überbelastung des Bordnetzes sehr anschaulich. Abbildung 4.7 zeigt, passend zur Belastung des Bordnetzes, die Generator- sowie Batterieströme und -spannungen.

Reaktion
Bordnetz

Zu Beginn des Manövers wird nur wenig elektrische Leistung benötigt. Hier wird dem Bordnetz aus simulationstechnischen Gründen noch nicht die volle Leistung entsprechend des Lastzyklus entnommen. Ab ca. 0,5 s wird dann entsprechend der zuvor definierten Leistungsverläufe eine Verbraucherleistung (Nebenverbraucher ohne EPS) von 2 000 W gefordert. Es ist deutlich zu sehen, dass der Generator nun mehr Strom liefert. Die Batterie wird nicht weiter geladen. Die Bordnetzspannung sinkt insgesamt ab. Beim Erreichen der Leistungsgrenze des Generators (ca. 160 A) liefert die Batterie zusätzliche Leistung (Batteriestrom $I_B < 0$). In den kurzen Phasen, in denen die EPS Energie rekuperiert, ist deutlich zu sehen, dass die Bordnetzspannung angehoben wird.

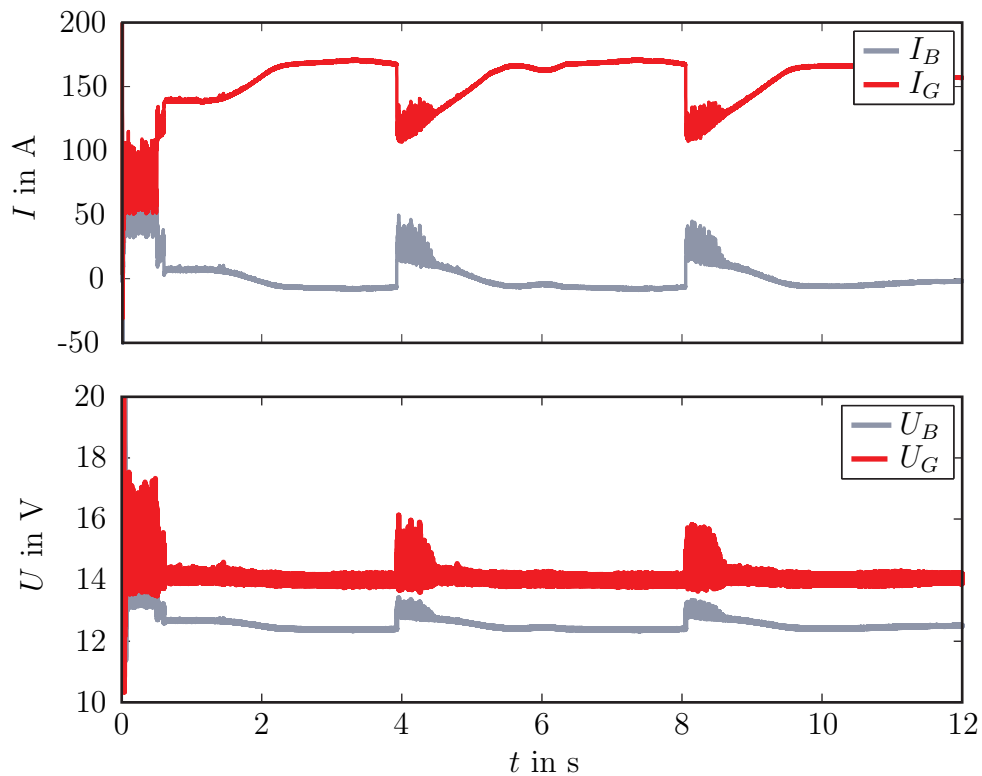


Abbildung 4.7: Generator und Batterieverhalten beim Durchlenken im Stand

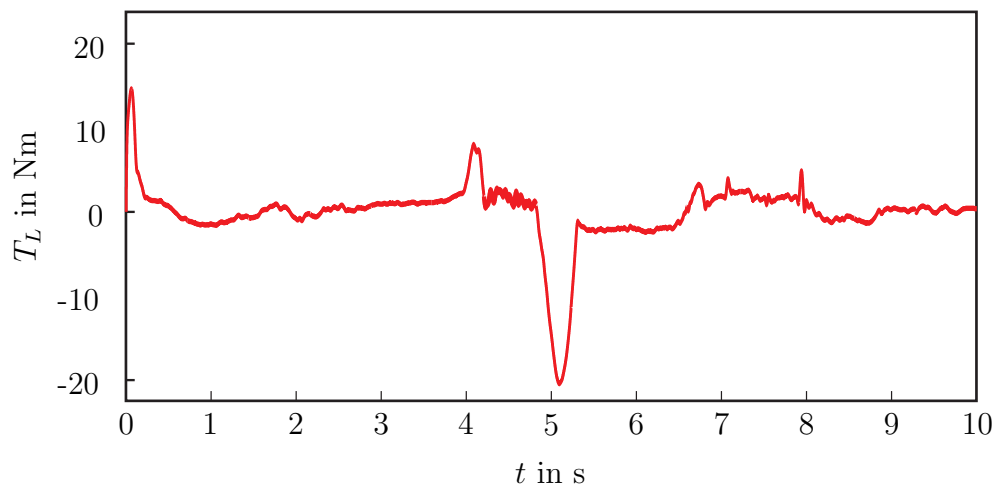


Abbildung 4.8: Handmoment beim doppelten Spurwechsel

Im Vergleich zu dem Manöver „Durchlenken im Stand“ zeigt der doppelte Spurwechsel das Verhalten der Lenkung bei hochdynamischen Lenkbewegungen wie etwa im Bereich des Notausweichens. Abbildung 4.8 zeigt den Verlauf des geforderten Handmoments beim doppelten Spurwechsel. Für die Simulation ist ein einfaches Fahrermodell für die Querdynamik verwendet worden wie es in RENSKI [82]

Schnelle
Lenkbewegung

zu finden ist. Dieses stellt abhängig von der gewünschten Bahn den benötigten Lenkradwinkel. Die Parameter für das Fahrermodell nach RENSKI können aus Versuchen abgeleitet werden.

Sehr großes
Handmoment

Das Handmoment steigt beim doppelten Spurwechsel, wie in Abbildung 4.8 gezeigt, auf 20 Nm an. Dies ist eine Größenordnung, die nur noch schwer aufzubringen ist. Die deutlich sichtbare Überhöhung des Handmoments bei ca. 5 s Simulationszeit ist auf mehrere Faktoren zurückzuführen. Zum ersten ist hier aufgrund der Fahrdynamik die wirkende Zahnstangenkraft sehr groß. Zum zweiten ist die Lenkradwinkelgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Zurücklenkens sehr groß, was zu einer starken induzierten Spannung am Anker des EPS-Aktors führt. Beides zusammen hat zur Folge, dass die EPS die benötigte Unterstützung nicht liefern kann.

Energie-
management
notwendig

Die vorangegangenen Simulationen zeigen, dass die zu hohe Bordnetzbelastung nicht nur zu einer unerwünschten Absenkung der Bordnetzspannung, sondern auch zu Situationen führt, die vom Fahrer deutlich spürbar sind. Eine Überhöhung des Handmoments auf bis zu 20 Nm ist zudem vom Fahrer kaum noch beherrschbar². Es muss also ein System implementiert werden, das in Szenarien wie den oben gezeigten dafür sorgt, dass die Bordnetzspannung möglichst stabil und hoch gehalten wird. Gerade für den Komfortbereich (Durchlenken im Stand) wird der Fahrer das erhöhte Handmoment nicht akzeptieren. Fraglich bleibt, ob er eine Überhöhung in einer Gefahrensituation als solche bewusst wahrnimmt und ob diese zu einer veränderten Bewertung des Gesamtsystems oder sogar zu einer weiteren Gefährdung führt.

4.3 Bordnetzbelastung mit Energiemanagementsystem

Funktion
Lenkung
gewährleisten

Die Simulationsergebnisse aus Abschnitt 4.2 zeigen deutlich, dass es beim Durchlenken im Stand unter Verwendung der Verbraucherleistung entsprechend der Abbildungen 4.3 und 4.4 zu einer deutlich spürbaren Verhärtung der Lenkung kommt. Diese hat ihre Hauptursache in einer Überbelastung des Bordnetzes und der damit zusammenhängenden Spannungsabsenkung.

Spannungs-
stabilisierung

Der in Kapitel 3.6 beschriebene Algorithmus wird nun dazu verwendet, die Bordnetzspannung auf einem Niveau zu halten, das der Lenkung eine einwandfreie

²Testfahrten im Fahrsimulator am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen haben gezeigt, dass ein Niveau von 16 Nm am Lenkrad ausreichend ist, um einen harten Anschlag zu simulieren. Abhängig vom Probanden kann das Lenkrad zwar auch bei einem Widerstand von 16 Nm gedreht werden, dies kann allerdings nicht mehr als lenkbar bewertet werden.

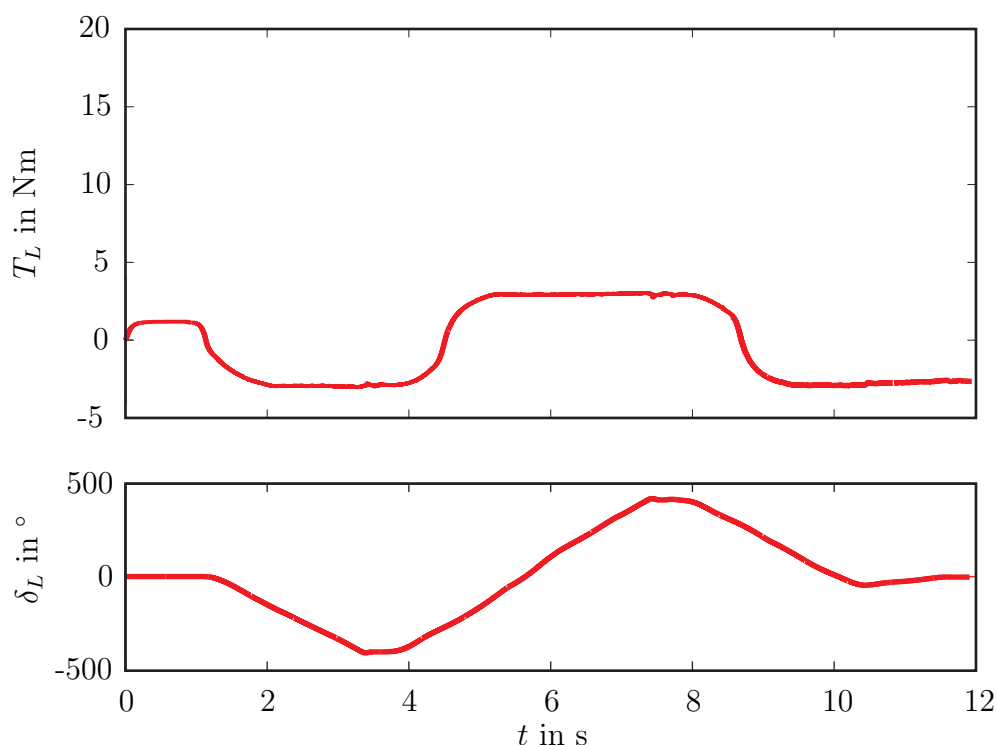


Abbildung 4.9: Handmoment beim Durchlenken im Stand (oben) unter Verwendung des EEM; Lenkradwinkel (unten)

Funktion gewährleistet. Dies hat das Ziel, dass der Fahrer möglichst keinerlei Veränderung der Lenkung spüren sollte. Im Unterschied zu vielen Arbeiten zum intelligenten Energiemanagement im Leistungsbordnetz eines Kraftfahrzeugs werden hier schnell veränderliche Verbraucher betrachtet. Dies ist besonders deshalb wichtig, weil es zu großen Gradienten für Strom und Spannung im Bordnetz kommen kann, was für das Energiemanagement eine besondere Herausforderung darstellt.

Abbildung 4.9 zeigt den Verlauf des Handmoments beim „Durchlenken im Stand“ unter Verwendung des EEM.

Es ist deutlich zu erkennen, dass unter Einsatz des EEM das benötigte Handmoment auf ein komfortables Maß von ca. 3 Nm abnimmt. Für eine parkierähnliche Situation bedeutet dies, dass der Fahrer ohne Beeinträchtigung lenken kann. Abbildung 4.10 zeigt den Verlauf der Bordnetzspannung sowie der vom Regler an den EPS-Aktor angelegten Spannung.

Reduzierung
Handmoment

Im Vergleich zur Abbildung 4.6 kann eine deutliche Beruhigung der Bordnetzspannung gesehen werden. Dies wird durch gezieltes Abschalten einzelner Verbraucher erreicht und führt dazu, dass die EPS als sehr wichtiger Verbraucher während des gesamten Szenarios genügend elektrische Leistung zur Verfügung hat.

Bordnetzspannung
beruhigt

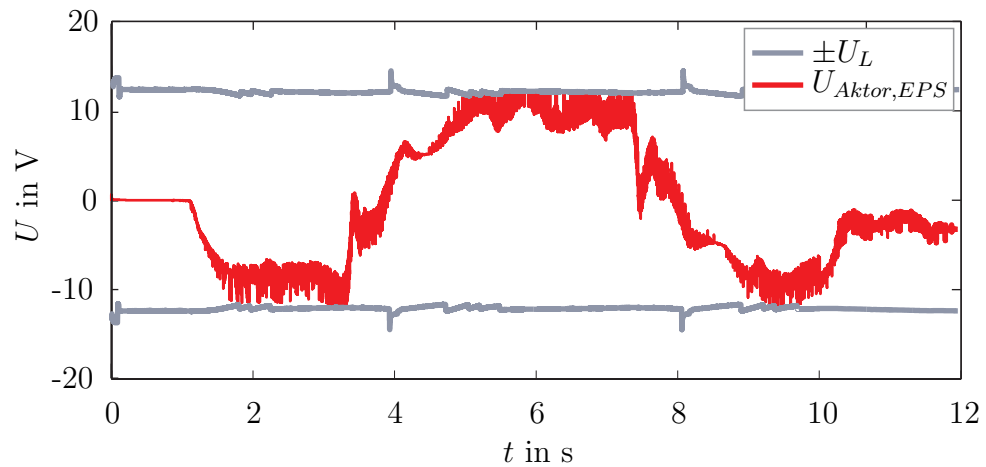


Abbildung 4.10: Regelspannung am EPS-Aktor unter Verwendung des EEM

Im Vergleich zum „Durchlenken im Stand“ zeigt sich für den doppelten Spurwechsel ein etwas anderes Bild. In Abbildung 4.11 ist das Handmoment für den Spurwechsel unter Verwendung des EEM aufgetragen.

Handmoment
nicht weiter
reduzierbar

Wie deutlich zu sehen ist, kann das verwendete EEM auch unter idealisierten Annahmen eine Verhärtung der Lenkung nicht komplett beheben. Das benötigte Handmoment wird allerdings von 20 Nm auf ca. 10 Nm herabgesetzt. Während des Spurwechsels ist das EEM nicht in der Lage die Lenkung mit mehr Leistung zu versorgen. Dies liegt an der sehr schnellen Lenkbewegung und der daraus resultierenden Rückinduktion am EPS-Aktor. Unter normalen Betriebsbedingungen ist dies ein immer noch inakzeptabler Wert. Ob dies in Sondersituationen, wie etwa einem Notausweichmanöver, tolerierbar ist, wird in Kapitel 6 anhand von Echtzeitsimulationen im Fahrsimulator genauer untersucht.

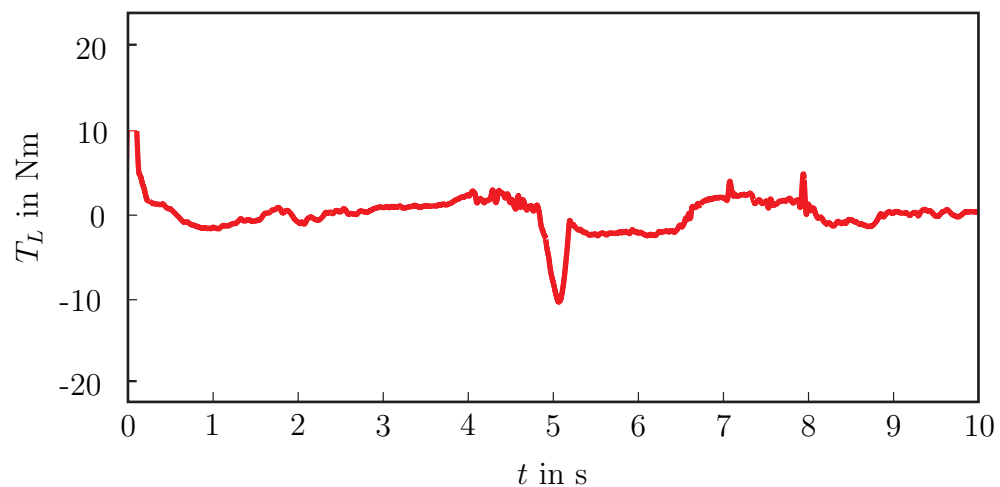


Abbildung 4.11: Handmoment beim doppelten Spurwechsel unter Verwendung des EEM

4.4 Implikationen für weitere Untersuchungen

Die Analyse der Managementstrategien hat gezeigt, dass der herrschende Energiemangel im Bordnetz gezielt auf solche Verbraucher abgeleitet wird, die nicht für den Fahrbetrieb oder die Sicherheit eines Kfz notwendig sind. Abhängig von einem Leistungspuffer können damit Energiemangelsituationen frühzeitig behoben werden.

Leistungsum-
verteilung
möglich

Für eine sichere Gewährleistung der wichtigsten Funktionen wird ein Leistungspuffer vorgesehen. Das bedeutet, dass nicht die gesamte Energie, die zur Verfügung steht, genutzt wird. Ein Abschalten der Verbraucher im Bordnetz kommt somit teilweise zu früh. Die Größe des Leistungspuffers kann also nur ein Kompromiss zwischen Funktionalität (z.B. der EPS) und Verfügbarkeit niederprioritärer Verbraucher sein. Aus Sicht der Verfügbarkeit und der Ladebilanz ist ein möglichst geringer Leistungspuffer von Interesse. Die Funktionssicherheit sicherheitsrelevanter Verbraucher wird allerdings durch eben diesen verringert. Die Frage, die sich hier stellt, ist:

Kompromiss aus
Sicherheit und
Verfügbarkeit

Welches Leistungsdefizit ist tolerierbar und wie lange darf es anhalten?

Mit Beantwortung dieser Frage kann das Verhältnis zwischen Verfügbarkeit aller Verbraucher und Funktionssicherheit einzelner wichtiger Verbraucher optimal ausgelotet werden.

Eine solche Frage kann nur vor dem Hintergrund einer vom Anwender (Fahrer) vorgenommenen Bewertung gemacht werden. Letztlich darf der Fahrer möglichst wenig Einschränkungen in seinen ihn unterstützenden Funktionen erfahren. In den folgenden Kapiteln wird ein Werkzeug vorgestellt, mit dem eine solche menschenzentrierte Eigenschaftsabsicherung vorgenommen werden kann. Es werden weiterhin Bewertungen und Anpassungen der Energiemanagementstrategien im Hinblick auf den Fahrer während des Fahrzeugbetriebs vorgenommen.

Fahrer als
Messinstrument

Echtzeitsimulation unter Verwendung eines Simulators

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass es in verschiedenen Fahrsituationen und Bordnetzkonfigurationen zu Leistungsengpässen kommt. Dies hat für Systeme wie der elektrischen Servolenkung zur Folge, dass der Fahrer eine Verhärtung der Lenkung spürt. Die offline-Simulationen können jedoch eine entscheidende Frage nicht klären: „Wie erlebt der Fahrer den Leistungseinbruch und kommt es zu subjektiv gefährlichen Situationen?“

Zur Beantwortung dieser und ähnlicher Fragestellungen im Zusammenhang mit menschenzentrierten mechatronischen Systemen werden Fahrsimulatoren eingesetzt. Der Fahrer kann so als Messinstrument eingebunden werden, wie es unter anderem auch NEUKUM (2001, [72]) fordert. Im folgenden Kapitel werden zunächst der Aufbau und das Grundkonzept des verwendeten Simulators beschrieben, bevor dann auf gezielte Bordnetzuntersuchungen eingegangen wird.

Grundlage einer Simulatoruntersuchung ist die echtzeitfähige Modellierung aller relevanten Komponenten. In diesem Kapitel wird kurz dargelegt, wie die in Kapitel 3 entwickelten Modelle hinsichtlich ihrer Echtzeitfähigkeit optimiert werden.

5.1 Grundkonzept des Simulators

Fahrer muss
berücksichtigt
werden

Durch die zunehmende Funktionserweiterung bestehender Systeme und die Einführung neuer Assistenzsysteme im Kraftfahrzeug wird immer stärker in die Grundaufgaben des Fahrers (Fahrzeugführung nach Ebenenmodell laut DONGES 1996, [29]) eingegriffen. Die Prämisse, dass der Fahrer als oberste Instanz im Auto nicht abgelöst werden darf, wie es bereits 1968 in Wien [1] beschlossen wurde, bleibt jedoch weiterhin bestehen. Zudem ist eine zu starke Bevormundung des Fahrers auch aus Akzeptanzgründen zu vermeiden. Gerade diese Sichtweise auf technische Systeme macht deren Entwicklung komplex. Neben der technischen Realisierung der Systeme ist also vor allem der Faktor Mensch sowie die Kommunikation zwischen diesem und dem Fahrzeug von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Dieses muss, wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, im Kontext zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt funktionieren.

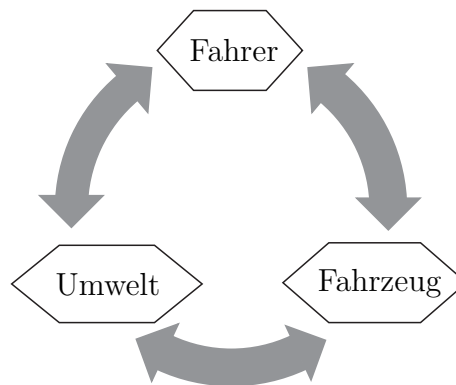


Abbildung 5.1: Wechselwirkung zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt angelehnt an [61]

Menschzentrierte
Forderungen

Im Entwicklungsprozess müssen daher neben den „harten“ technischen Anforderungen an Assistenzsysteme auch menschzentrierte Aspekte, wie etwa die Akzeptanz beim Fahrer, entsprechend berücksichtigt werden. Aus Kostengründen ist dabei eine möglichst frühe Absicherung der geforderten Systemeigenschaften „Fahrer-Fahrzeug“ wünschenswert.

Die EPS ermöglicht einen deutlichen Funktionszugewinn und neuartige Assistenzsysteme wie etwa moderne Spurhaltesysteme. Dabei stellt die Lenkung nicht nur ein komplexes mechatronisches System dar, sondern fungiert gleichzeitig als Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Kommunikations-
forschung

Der Entwicklungsprozess eines jeden Assistenzsystems impliziert die Entwicklung der Kommunikationsstruktur zwischen Fahrer und Fahrzeug. Die Kommunikation

zwischen Mensch und Maschine ist, wie beschrieben, eines der Kernelemente eines funktionierenden Assistenzsystems. Nicht nur die Tatsache, dass der Mensch die Schnittstelle zum Fahrzeug als erstes wahrnimmt und dadurch der erste Eindruck des Fahrzeugs mitbestimmt wird, sondern auch die Funktionalität des Gesamtsystems wird durch diese maßgeblich geprägt. Die grundlegende Kommunikationsstruktur zwischen zwei Parteien wurde erstmals von SHANNON (1948, [96]) beschrieben und dann von der Kommunikationswissenschaft schnell auf die Mensch-Maschine Kommunikation angewendet. Gerade weil die Kooperation von Mensch und Maschine einen solchen Stellenwert in der Entwicklung moderner technischer Systeme einnimmt, ist es jedoch umso erstaunlicher, dass, nachdem diese grundlegenden Arbeiten abgeschlossen wurden, lange Zeit der Bereich der menschlichen Kommunikation nicht tiefschürfend untersucht wurde [38].

In Ermangelung geeigneter Modelle zum menschlichen Verhalten bei verschiedenen Stimuli müssen bei der Entwicklung von Assistenz- oder anderen menschenzentrierten mechatronischen Systemen weiterhin Versuche mit dem echten Fahrer durchgeführt werden. Es ist möglich, den Fahrer und dessen fahrerspezifisches Verhalten in bestimmten Situationen mathematisch zu beschreiben, was bei der Gesamtfahrzeugsimulation immer wieder erfolgreich gemacht wird, z.B. bei FISCHER [35]. So können, wie BRANDT es in [21] macht, z. B. die Stabilität und Leistungsfähigkeit vom Fahrer im Gesamtsystem begrenzt dargestellt werden. Auch eine Berücksichtigung vom individuellen Fahrerverhalten kann wie bei MIKELSONS [68] teilweise berücksichtigt werden. Die Komplexität eines echten Fahrers in allen relevanten Facetten und vor allem dessen subjektive Beurteilung einer Situation übersteigt jedoch weiterhin die Möglichkeiten einer Simulation. Die daraus resultierende nötige Integration des Fahrers in den Entwicklungsprozess muss sowohl schnell und kostengünstig, als auch für das spätere System aussagekräftig sein. Das generelle Vorgehen bei der Erprobung der angesprochenen Systemklasse ist an das V-Modell zur Entwicklung mechatronischer Systeme nach VDI-2206 (2004, [4]) angelehnt und läuft in zwei Ebenen ab. In Anlehnung an das V-Modell zur Entwicklung mechatronischer Systeme sind in Abbildung 5.2 diese verschiedenen Ebenen im Entwicklungsprozess dargestellt.

Mensch Modelle
unzureichend

Die im V-Modell beschriebene iterative Entwicklung eines mechatronischen Systems kann im Bezug auf Assistenzsysteme im Kfz oftmals nur schwer lückenlos durchgeführt werden. Sie verlangen nach den ersten simulationsbasierten Tests sehr schnell nach einer Einbindung des Fahrers in den Entwicklungsprozess, was oftmals dadurch erreicht wird, dass mit realen Prototypen getestet wird. Der wiederholte Aufbau von Prototypen während der Entwicklung eines Systems verlangsamt diesen erheblich und verursacht zusätzliche Kosten. Fahrsimulatoren werden in verschiedensten Bereichen daher schon seit geraumer Zeit dazu eingesetzt, diese

Lückenloses
Vorgehen nach
V-Modell

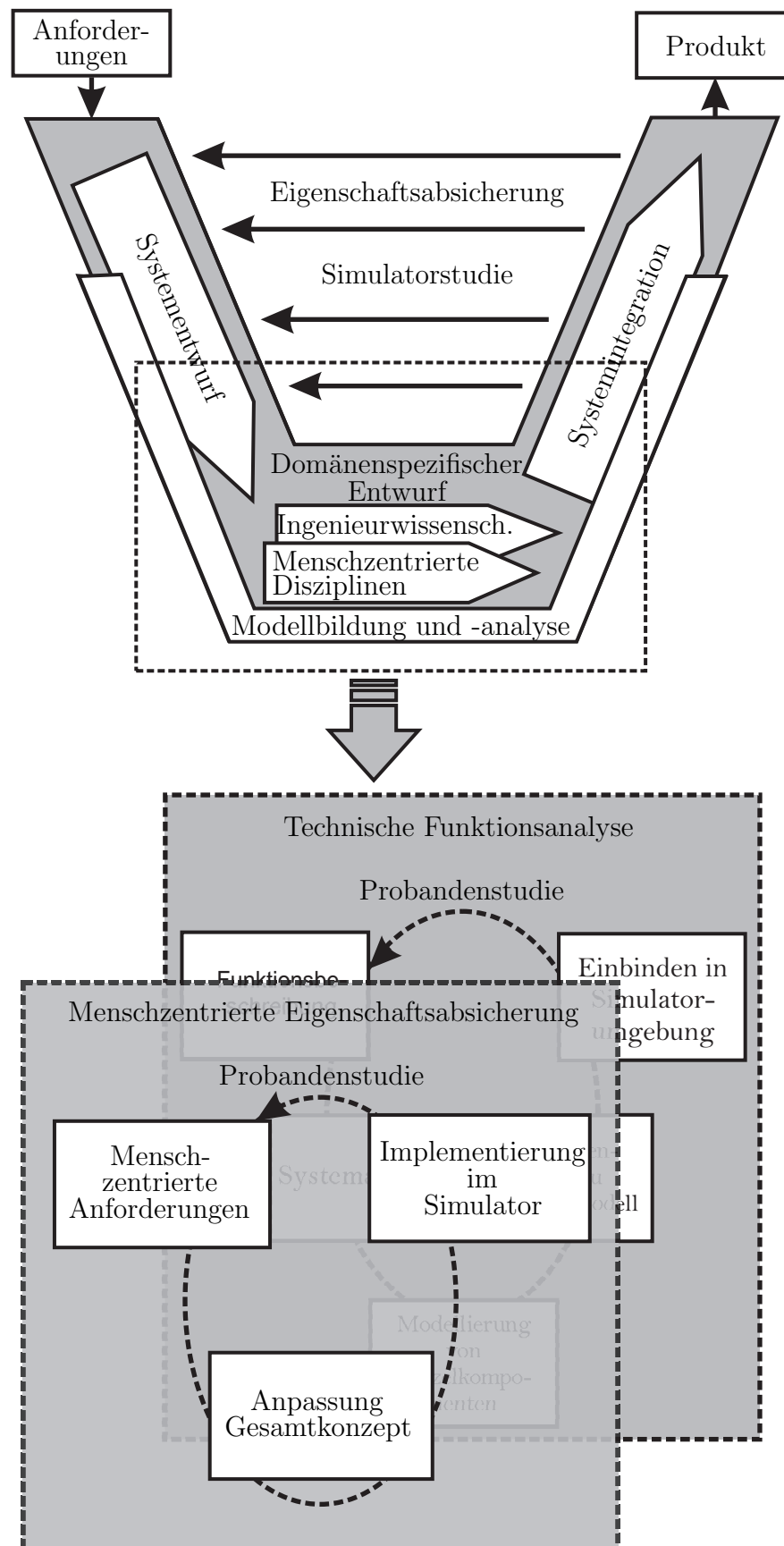


Abbildung 5.2: Entwicklung menschzentrierter mechatronischer Systeme im Entwicklungszyklus

Lücke zwischen Offline-Simulationen und Tests am Prototypen zu schließen. Bekanntermaßen können so die Entwicklungszyklen verkürzt und die Kosten gesenkt werden.

Neben der Umsetzung der technischen Funktion eines Systems wird immer häufiger die Interaktion eines Systems mit dem Bediener interessant. Gerade bei einem System wie einer EPS ist es weniger von Interesse, dass die nötige Leistung zum Lenken kurzzeitig nicht zur Verfügung steht (vgl. Kap. 4), sondern ob der Fahrer diese Leistungslücke bemerkt und wie diese dann beurteilt wird. Solche Fragen der Mensch-Maschine-Interaktion werden im Automobilbereich verstärkt gestellt. Dieser Trend wird nicht nur durch innovative Anzeige- und Bedienkonzepte, sondern auch durch immer komplexer werdende Systeme im Kfz forciert.

Fahrer wird
untersucht

Diese modernen Fahrzeugsysteme erfordern die in Abbildung 5.2 dargestellte Entwicklung im V-Zyklus mit verschiedenen Ebenen. Parallel zu der technischen Entwicklung wird die Untersuchung der Mensch-Maschine-Schnittstelle vorangetrieben. Dies garantiert nicht nur eine optimale technische Funktion, sondern auch die bestmögliche Abstimmung auf den Fahrer.

Realer Fahrer
muss integriert
werden

Der strukturelle Aufbau des verwendeten Simulators, wie er bereits in HESSE (2009), HIESGEN (2008) oder BRANDT (2009) [20,52,54] beschrieben wird, kann in Abbildung 5.3 gesehen werden.



Abbildung 5.3: Simulatorstruktur angelehnt an Kommunikationsstruktur nach SHANNON [96]

Wie in Abbildung 5.3 dargestellt, besteht die Simulatorstruktur grundsätzlich aus den Teilen

- Fahrer/Fahrerarbeitsplatz, der
- Mensch-Maschine-Schnittstelle und der
- Simulation.

Unter dem Fahrerarbeitsplatz wird die Umgebung sowie die Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug zusammengefasst. Von entscheidender Bedeutung für Untersuchungen ist hierbei, dass der Fahrerarbeitsplatz an die gewünschte Untersuchung angepasst ist.

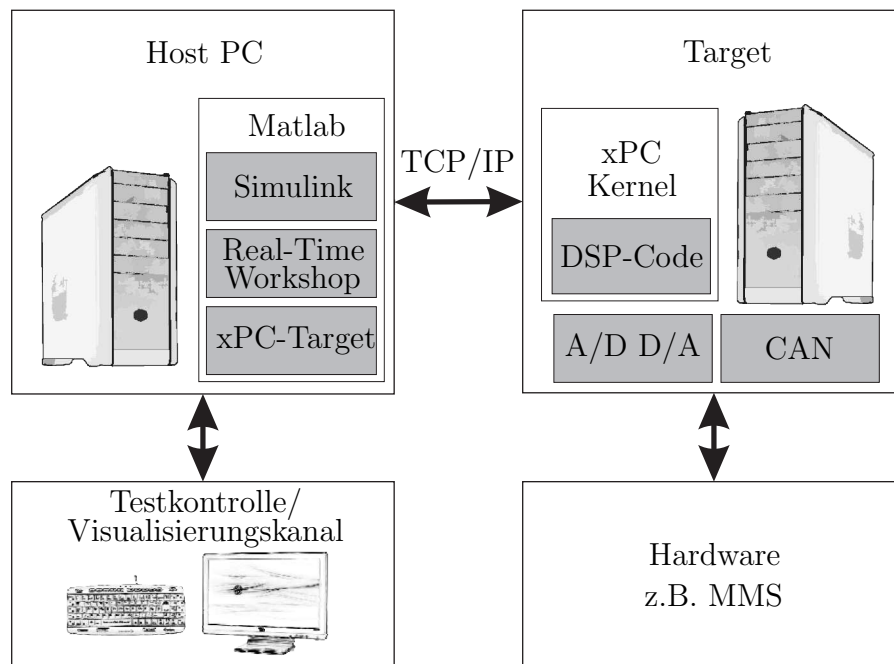


Abbildung 5.4: Simulatorsoftwarestruktur unter Verwendung des xPC-Targets

5.1.1 Softwarestruktur

Die in diesem Abschnitt beschriebene Softwarestruktur gliedert sich in die eigentliche Simulatorsoftware und die Modellstruktur. Während die Simulatorstruktur für verschiedene Untersuchungen unverändert bleibt, muss das jeweilige Modell an den Versuch und das zu untersuchende System angepasst werden.

Struktur der Simulatorsoftware

Simulations-
struktur

Die Struktur der Simulatorsoftware ist durch die Kombination eines Echtzeitsystems mit einer leistungsfähigen Game Engine gegeben. Beide Prozesse müssen für einen korrekten Ablauf der Gesamtsimulation synchronisiert werden. Die Game Engine (Visualisierung, Akustik) ist ein entscheidender Bestandteil der Softwarestruktur. Trotzdem wird sie an dieser Stelle nicht näher erläutert, sondern ist dem Abschnitt 5.1.2 (Mensch-Maschine-Schnittstelle) zugeordnet. Die im Simulator verwendete Softwarestruktur kann in Abbildung 5.4 gesehen werden.

Schnelle
Anpassung von
Modellen

Bei der Verwendung eines Simulators in der Forschung ist es essentiell, dass Änderungen an den Simulationsmodellen sehr leicht umsetzbar sind. Modelländerungen dürfen keinen Simulatorexperthen erfordern, sondern müssen von dem eigentlichen Systementwickler umsetzbar sein. Diese Forderung lässt sich dadurch erfüllen, dass Standardsoftware für die Erstellung der Simulationsmodelle verwendet wird.

MATLAB/Simulink ist ein solches Standardprogramm für die Modellierung und Simulation technischer Systeme. Die Echtzeitsimulation wird deshalb mit Hilfe der Mathworks xPC-Target Toolbox durchgeführt. Dieses Vorgehen sichert ein hohes Maß an Flexibilität und zugleich einen vergleichsweise günstigen Simulatorenbau. Standard MATLAB-Modelle, wie sie in vielen Bereichen des Ingenieurwesens eingesetzt werden, können zur Echtzeitsimulation eingesetzt werden. Neben der Softwarestruktur ist in Abbildung 5.4 auch das Vorgehen beim Erstellen eines Echtzeitmodells zu sehen.

Das Erstellen eines Echtzeitmodells beginnt mit der regulären Modellierung des zu untersuchenden Systems in MATLAB(/Simulink). Unter Berücksichtigung einiger Regeln zur Modellierung kann dann mit Hilfe des MATLAB Real-Time Workshops echtzeitfähiger Code kompiliert werden. Die xPC-Target Toolbox erlaubt dem Benutzer danach, das Echtzeit-Target zu erstellen und das kompilierte Modell über TCP/IP auf das Echtzeitbetriebssystem zu laden [66]. Die Echtzeitsimulation kann vom Host gestartet und gestoppt werden. Das Target kann verschiedene Modellgrößen über unterschiedliche Wege empfangen und senden. Dabei ist neben dem Host-PC vor allem die Einbindung von Hardware (z.B. einer Force-Feedback-Lenkung) wichtig. Die verschiedenen IOs können so auch zum Aufbau von HIL (Hardware In the Loop) Prüfständen verwendet werden [66].

Erstellen von
Echtzeitmodellen

Modellstruktur und Echtzeitanforderungen

Die Modellstruktur wird durch das jeweils untersuchte System vorgegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird, wie in Kapitel 3 ausführlich dargelegt, das Gesamtsystem aus Fahrzeug und Fahrzeugbordnetz untersucht. Dabei wird die in Abbildung 3.1 gezeigte Gesamtstruktur für das Modell verwendet.

Modellstruktur
systembedingt

In Erweiterung der Simulatorgrundstruktur (Abb. 5.4) wird bei der gekoppelten Simulation von Fahrzeug und Bordnetz mit zwei xPC gearbeitet. Dieses Vorgehen wird aufgrund nötiger sehr geringer Schrittweiten im elektrischen System notwendig. Die Fahrzeugdynamik und das Bordnetz sind grundsätzlich gekoppelt. Die Kopplung der Teilmodelle ist jedoch nur sehr gering, so dass eine parallele Berechnung auf zwei xPC möglich ist. Die Parallelisierung der Modellstücke kann dabei sehr gut händisch vorgenommen werden.

2. xPC für
Bordnetz-
simulation

Insbesondere das Generatormodell (vgl. Kap. 3.5.2) stellt sehr hohe Anforderungen an das Echtzeitsystem. Die zugrunde liegende Generatordrehzahl liegt aufgrund der mechanischen Übersetzung bereits beim zwei- bis dreifachen der Motordrehzahl. Für die im Generatormodell auftretenden Frequenzen wird diese zusätzlich

Integrations-
schrittweite
Bordnetzmodell

durch die Anzahl der Polpaare um das sechs- bis siebenfache erhöht. Die im Generatormodell berechneten sinusförmigen Schwankungen der Ausgangsspannung liegen demnach bei bis zu 2 500 Hz. Wird bei der Simulation ein einfaches explizites Lösungsverfahren mit fester Schrittweite verwendet (z. B. Euler-Integrator) und werden aus Gründen der Robustheit und Stabilität ca. 10-20 Integrationsschritte pro Periode der Sinusschwingung gefordert, so resultieren Integrationsschrittweiten von $t_i = 2,5 \cdot 10^{-5}$ s. Neben dem Generator sind zusätzlich, gerade aufgrund der zu erwartenden Lastwechsel im Bordnetz, hohe Gradienten für die Ströme (und direkt damit verbunden den Spannungen) zu erwarten. Bei einer Offline-Simulation kann dies noch durch die Wahl eines Integrators mit Schrittweitensteuerung oder einem impliziten Verfahren abgefangen werden. In einem Echtzeitprozess wird direkt eine geringere Schrittweite notwendig.

Beschränkung
des
Bordnetzmodells

Auch mit heutigen CPUs ist die geforderte Schrittweite in einem Echtzeitprozess für das gezeigte Bordnetzmodell nicht darstellbar. Um das Bordnetz dennoch in Echtzeit zu simulieren, muss die auftretende Dynamik begrenzt werden, was wiederum zu einer größeren Integrationsschrittweite führt. Bei der Betrachtung des Generatorstroms über der -drehzahl (vgl. Abb. 3.26) ist deutlich erkennbar, dass der maximale Generatorstrom (-leistung) ab einer Drehzahl von ca. 1/3 der maximal auftretenden Generatordrehzahl nicht weiter steigt. Die Integrationsschrittweite kann also bei einer Begrenzung der im Modell berücksichtigten maximalen Generatordrehzahl deutlich erhöht werden. Die Begrenzung der Generatordrehzahl ist bei reinen Betrachtungen der Generatorleistung zulässig. Eine Analyse der Welligkeit der Generatorspannung oder dessen Einfluss auf das Bordnetz bei höheren Drehzahlen kann so allerdings nicht mehr durchgeführt werden. Sehr hohe Gradienten in Strom und Spannung müssen zusätzlich über eine geschickte Wahl von Filtern begrenzt werden. Dies limitiert wiederum die Gültigkeit des gesamten Bordnetzmodells, macht aber eine Simulation in Echtzeit möglich.

5.1.2 Mensch-Maschine-Schnittstellen und Simulatorenbau

Drei
Kommunikations-
kanäle

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle erfolgt, wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist, in drei Ebenen¹. Jede Ebene kann als Informationskanal zwischen Fahrer und Fahrzeug interpretiert werden, wobei es allerdings auch zu Störungen zwischen den Kanälen kommen kann.

¹Neben den drei im Simulator betrachteten Kommunikationskanälen Akustik, Optik, und Haptik verfügt der Mensch natürlich noch über die Möglichkeit der Olfaktorik oder Gustatorik. Diese Kanäle haben allerdings für das Führen eines Kfz nahezu keinerlei Bedeutung. Zudem ist er für einen gezielten schnellen Informationsaustausch ungeeignet, so dass er hier nicht näher betrachtet wird.

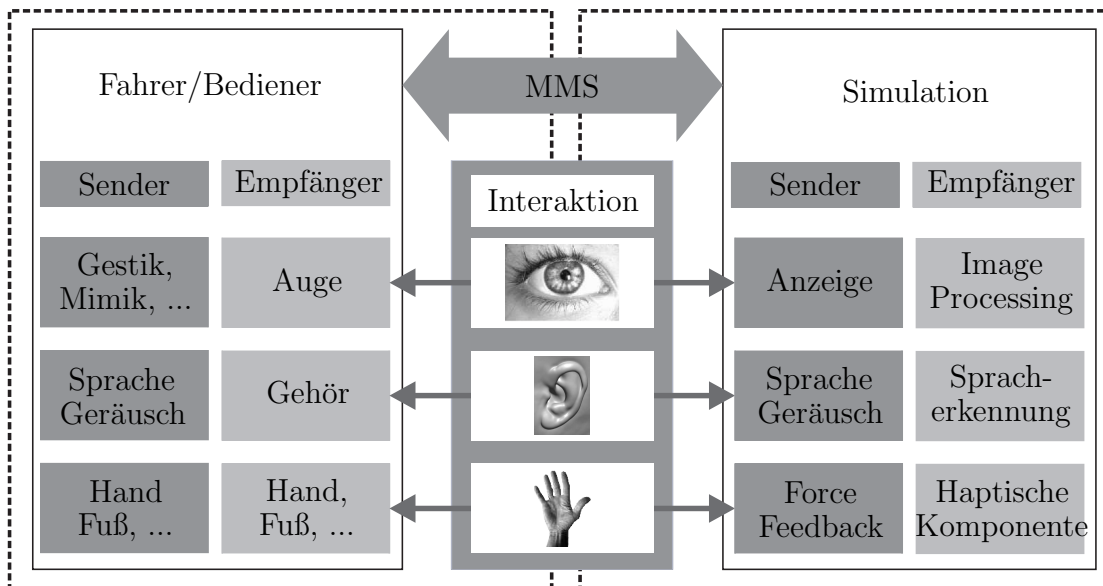


Abbildung 5.5: Struktur der MMS im Simulator ausgehend von [61]

Die beim normalen Autofahren wichtigste Ebene ist die visuelle Ebene. Der Großteil der Informationen, die der Fahrer zum Führen des Fahrzeugs benötigt, wird aus dieser Informationsquelle bezogen. Daneben sind die Akustik und die Haptik von Interesse. Gerade bei modernen Assistenzsystemen, die z.B. direkt in die Lenkung eingreifen, treten diese Kanäle in den Vordergrund. Aber auch beim regulären Fahren ohne Assistenz spielen die Bewegungen des Fahrzeugs und Geräusche in einem Kfz eine wichtige Rolle für den Fahrer. Über die genannten drei Kanäle kommuniziert der Fahrer auch im Simulator mit der Simulationsumgebung. In den folgenden Abschnitten wird kurz auf die Kanäle der MMS und deren Aufbau im Simulator eingegangen.

Visueller Kanal

Der visuelle Kanal wird beim Führen eines Fahrzeugs vom Fahrer verwendet, um unterschiedlichste Informationen zu sammeln. Dazu zählen sowohl Informationen zur Umgebung des Fahrzeugs als auch solche zum Fahrzeugzustand (Geschwindigkeit, Assistenzsysteme usw.). In dem Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen werden die visuellen Reize mit Hilfe eines leistungsstarken Graphiksystems erstellt. Die TORQUE GAME ENGINE 3D[®] (2010, [41]) wird mit der Echtzeitsimulation gekoppelt und kann eine komplexe dreidimensionale Szenerie darstellen.

Torque Game
Engine[®]

Blickwinkel 120 °

Der optische Fluss ist einer der meistuntersuchten Reize bei Fahrsimulatoren. Er wird als das Bewegungserlebnis beim Fahren, Rennen oder Laufen definiert. Er wird vom menschlichen Gehirn aufgenommen und sehr genau analysiert. Dies hilft bei der Fortbewegung in eine bestimmte Richtung [57]. Der optische Fluss hilft in manchen Szenarien auch Entfernungen einzuschätzen [33]. JAMSON hat 2000 in [56] gezeigt, dass für eine korrekte Wahrnehmung der Geschwindigkeit ein horizontaler Blickwinkel von mindestens 120 ° notwendig ist. Auch im Simulator zeigt sich, dass im peripheren Sichtbereich Objekte vorhanden sein müssen, die sich am Fahrer vorbeibewegen, damit eine Geschwindigkeit eingeschätzt werden kann. Der verwendete Simulator ist daher so konzipiert, dass dem Fahrer mindestens dieser notwendige Blickwinkel gegeben wird. Abhängig von dem verwendeten Set-Up können Anzeigen (oder Projektoren) modular hinzugefügt werden, so dass auch ein Sichtbereich von 360 ° leicht realisierbar ist.

Die eingesetzte Game Engine erlaubt eine Visualisierung auf einem Realitätsgrad, der mehr als ausreichend ist, um Untersuchungen des menschlichen Verhaltens im Fahrzeug zu ermöglichen.

Akustischer Kanal**Akustik erhöht
Realitätsgrad**

Die Verwendung akustischer Reize in einem Fahrsimulator erhöht den Grad der Realität deutlich. Gerade die Fahrgeräusche tragen erheblich zu einem Geschwindigkeits- und Realitätsgefühl bei. Der Fahrer im Fahrzeug erwartet beim Beschleunigen ein steigendes Geräuschniveau und eine mit der Motordrehzahl veränderliche Grundfrequenz. Bei Geschwindigkeiten über 30 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ dominieren das Abrollgeräusch der Reifen und die Windgeräusche an der Karosserie. Die Implementierung typischer Fahrgeräusche und deren Modulation passend zum aktuellen Fahrzustand erhöht so den Realitätsgrad eines Simulators erheblich. Zusätzlich kann der akustische Kanal dazu verwendet werden, leichte Vibrationen in den Simulator einzuprägen.

**Akustischer
Kanal für MMS**

Im Bezug auf die MMS im Simulator ermöglicht es der akustische Kanal bestimmte Warntöne oder auch Sprache dazu zu verwenden, dem Fahrer Informationen gezielt zuteil werden zu lassen. Das akustische Warnen beim Verlassen der eigenen Fahrbahn ist hier genauso ein Beispiel wie die Routenführung eines Navigationssystems mittels Sprache. Umgekehrt kann auch der Fahrer eine Sprachsteuerung verwenden, um das System neu zu konfigurieren, so dass der akustische Kanal bidirektional funktioniert. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Möglichkeit allerdings nicht benötigt.

Die auch zur Visualisierung verwendete Game Engine ist in der Lage verschiedenste akustische Reize bereitzustellen. Es können sowohl getriggert akustische Signale abgespielt, als auch kontinuierliche Signale, wie das Fahrgeräusch, erzeugt werden [41].

Haptischer Kanal

Die haptische Wahrnehmung beschreibt zwei Bereiche. Die taktilen Reize sind von der Haut aufgenommene Informationen wie die Oberflächenbeschaffenheit eines Bauteils oder auch hochfrequente Schwingungen. Die kinästhetische Wahrnehmung basiert auf der Position und Bewegung von Gelenken sowie der Muskelspannung [57]. Neben den bereits angesprochenen Vibrationen sind vor allem das Design des Cockpits sowie die Charakteristik von Pedalen und Lenkung von entscheidender Bedeutung beim Aufbau eines Fahrsimulators.

Haptik
zweigeteilt

Bei der im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Untersuchung des Lenkgefühls nimmt die Charakteristik der Lenkung unbestritten einen übergeordneten Stellenwert ein. Das im Lenkungsmodell berechnete Handmoment wird dazu genutzt, ein realistisches Lenkgefühl zu gewährleisten. Hierzu wird ein von der Firma Sensodrive entwickeltes System in den Simulator verbaut. Das SensoWheel ist in der Lage, ein Soll-Handmoment exakt einzuregeln. Dazu wird ein leistungsfähiger Direktantrieb verwendet. Die Kommunikation mit dem Echtzeitprozess wird über eine CAN-Bus Schnittstelle ermöglicht [95]. Dieser Aufbau der Force-Feedback Lenkung ist bereits in verschiedenen Projekten im verwendeten Simulator mit großem Erfolg eingesetzt worden [52, 53]. Auch in den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit bewerten die meisten Probanden das Lenkgefühl als realistisch.

Lenkgefühl

Die Realisierung der fahrzeugspezifischen Pedalcharakteristik ist dadurch gegeben, dass die Serienpedale des Basisfahrzeugs verwendet werden. Im Hinblick auf die Kraft-Weg-Kennlinie des Bremspedals ist der Betrieb des Bremskraftverstärkers entscheidend. Dieser wird für die Simulation mit einer hierfür vorgesehenen Unterdruckpumpe verbunden. So kann auch ohne laufenden Motor das Bremspedalgefühl beibehalten werden.

Pedal-
charakteristik

Hardwareaufbau

Der in dieser Arbeit verwendete Hardwareaufbau basiert auf einem Ford Fiesta. Er ist ähnlich zur Abbildung 5.6.

Vor dem Fahrzeug werden drei große Monitore angeordnet, die einen Sichtwinkel

Blickwinkel

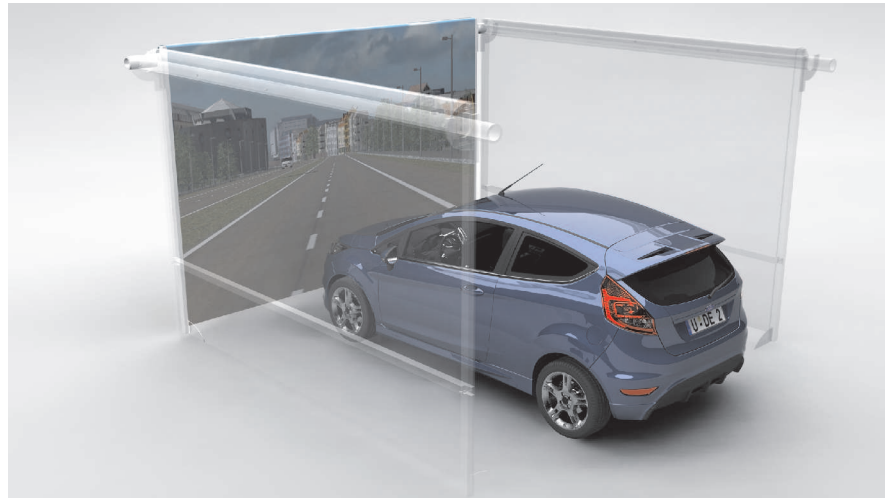


Abbildung 5.6: In der Untersuchung verwendeter Hardwareaufbau

von ca. 120° des Fahrers erlauben. Anders als in der Abbildung zu sehen, werden zusätzlich weitere Monitore zur rückwärtigen Ansicht über die Spiegel eingesetzt. Wie bereits erwähnt, können zu Versuchszwecken jedoch beliebige Anzeigen hinzugefügt werden, so dass der Sichtbereich modular erweiterbar ist. Der gezeigte Aufbau ist für autobahnähnliche Fahrsituationen konzipiert worden. Die Sicht des Fahrers ist unter Verwendung des dargestellten Set-Ups ähnlich zu Abbildung 5.7.



Abbildung 5.7: Fahrersicht im Simulator

Reale Karosserie

Die Verwendung eines realen Fahrzeugcockpits verspricht eine möglichst realitätsgetreue Reaktion des Fahrers, da sich dieser in der gewohnten Umgebung befindet. Um den haptischen und akustischen Kanal anzusprechen, wurde die Karosserie mit leistungsstarken Lautsprechern, sowie dem beschriebenen Force-Feedback Lenkrad erweitert.

5.2 Verwendete Methoden und Messtechnik

Um aus den Fahrsimulatorversuchen Aussagen zur Wechselwirkung zwischen Fahrer und System bestehend aus Fahrzeug und Bordnetz treffen zu können, müssen geeignete Methoden und Messtechniken identifiziert werden. Es gibt generell die Möglichkeit, das subjektive Empfinden des Fahrers zu bewerten und objektiv auswertbare Messungen zu verwenden. Beides wird im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt.

Methoden und
Messtechnik

5.2.1 Auswertung subjektiver Fahrerbewertung

Das Empfinden des Fahrers kann mittels Fragebögen gut bewertet werden. Dabei spielen natürlich die Erwartung des Fahrers und auch die Erfahrung mit Simulatoren und dem untersuchten System eine große Rolle für die individuelle Bewertung. Der Aufbau des Fragebogens ist entscheidend für die Güte der Ergebnisse. Hierbei gilt es Regeln zu befolgen, wie sie u. a. bei KIRCHHOFF [60] dokumentiert werden. Letztendlich muss trotz möglicher Schwierigkeiten mit subjektiven Empfindungen bei der Untersuchung eines menschenzentrierten Systems gerade auf diese großen Wert gelegt werden, da sie ein direktes Maß für die Akzeptanz eines Systems seitens des Nutzers sind.

Subjektives
Empfinden und
Akzeptanz

Daher ist für die bewußte kognitive Beurteilung einer Situation durch den Fahrer von Interesse, ob verschiedene Set-ups (Überhöhung des Handmoments beim Lenken) zu einer systematisch unterschiedlichen Beurteilung des Szenarios führen [37].

5.2.2 Objektive Messung des Fahrerempfindens

Eine objektive Messung physiologischer Größen im Simulatorversuch gibt im Gegensatz zum Fragebogen Aufschluss darüber, ob unbewusste, vegetative Reaktionen durch gegebene Stimuli hervorgerufen werden [18,19]. Hieraus können Schlüsse hinsichtlich technischer Verbesserungspotentiale getroffen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Erfassung der unbewußten Reaktionen die kardiovaskuläre und die elektrodermale Aktivität der Probanden beobachtet. Diese Größen wurden u. a. von FREY [37] erfolgreich eingesetzt, um den Fahrer eines Kfz zu beobachten.

Objektive
Messung

Kardiovaskuläres System

Das Herz-Kreislaufsystem stellt die Versorgung des Organismus sicher. Je nach Anforderung (z. B. durch körperliche Anstrengung) verändert sich daher die Aktivität des kardiovaskulären Systems (Pulsschlag, Blutdruck). Eine Veränderung im Herz-Kreislaufsystem wird in nicht unerheblichem Maß durch psychische Faktoren beeinflusst. Je nach Einschätzung einer Situation ergeben sich so Änderungen der kardiovaskulären Aktivität. Dabei kommt es bei einer als „unangenehm“ eingeschätzten Situation bereits zu erhöhter Herz-Kreislaufaktivität, bevor eine Reaktion auf die Situation ausgelöst wird. Die Steigerung der Herz-Kreislaufaktivität ermöglicht dem Körper eine zweckdienliche (angemessene) Reaktion [36, 45, 64].

Interbeat-Intervall

Zur Auswertung der kardiovaskulären Aktivität wird der mittlere Herzschlagabstand eines Probanden ermittelt, das sogenannte Interbeat-Intervall (*IBI*)². Das *IBI* ändert sich unter normalen Bedingungen bei gesunden Menschen lediglich in geringem Maße. Eine deutliche Veränderung lässt, bei fehlender körperlicher Beanspruchung, daher auf einen psychischen Stimulus schließen [36, 45, 64].

Ausgewertet wird das *IBI* für einen Probanden jeweils für ein Zeitfenster von zwei Sekunden vor Start eines Manövers, bis zwei Sekunden nach Abschluss des Manövers. Das jeweilige *IBI* kann aus der zeitlichen Differenz zwischen zwei R-Zacken

$$IBI_i = t_{R,i} - t_{R,i-1} \quad (5.1)$$

FREY gibt folgende Werte für den Zusammenhang der elektrokardialen Aktivität und einer veränderten Reaktionsbereitschaft an [37]:

Änderung des Interbeatintervalls	Veränderung der Reaktionsbereitschaft
> +18 ms	Deaktivierung
+6 ms bis +18 ms	Dämpfung
-6 ms bis +6 ms	Stabilität
-12 ms bis -6 ms	Aktivierung
< -12 ms	Überaktivierung

Tabelle 5.1: Elektrokardiale Aktivität im Bezug auf die Reaktionsbereitschaft [37]

²Als Interbeat-Intervall wird der Abstand zwei aufeinanderfolgender R-Zacken bezeichnet. Die R-Zacke eignet sich aufgrund der eindeutigen und gut erkennbaren Form im EKG im besonderen Maß zur Ermittlung des *IBI*.

Das elektrodermale System steht in enger Verbindung zur Aktivität eines im Hirnstamm angesiedelten Reizverarbeitungssystems. Dieses steuert die sogenannte Vigilanz (Aufmerksamkeit/Wachheit einer Person) [25, 36, 78]. Eine Veränderung der elektrodermalen Aktivität (EDA) ist daher ein Indikator für eine erhöhte Aufmerksamkeit, wie sie etwa in einer Situation mit erhöhtem Gefahrenpotential auftritt.

Elektrodermales
System

Nach FREY [37] können in der Literatur Richtwerte für die Verbindung der Hautleitfähigkeitsänderung³ und der Veränderung der Vigilanz gefunden werden.

Änderung der Hautleitfähigkeit	Veränderung der Vigilanz
$< -1 \mu S$	unterfordert
$-1 \text{ bis } +1 \mu S$	stabil
$1 \text{ bis } 5 \mu S$	aufmerksam
$5 \text{ bis } 7 \mu S$	hellwach
$7 \text{ bis } 9 \mu S$	alarmiert

Tabelle 5.2: Bewertung der elektrodermalen Aktivität im Bezug auf die Aufmerksamkeit einer Person [37]

Zur Erfassung der kardiovaskulären Aktivität (EKG), als auch der elektrodermalen Aktivität (SCR) wird im Rahmen dieser Untersuchungen ein Varioport der Firma BECKER MEDITEC GMBH eingesetzt.

5.2.3 Messung der Fahrzeuggrößen

Die Untersuchung in einem Simulator hat nicht nur den Vorteil, dass es relativ einfach ist, einen realen Fahrer in ein Szenario hineinzusetzen, wobei die getestete Situation mit allen Umgebungsbedingungen vollständig kontrollierbar und reproduzierbar ist. Wichtig für die Anordnung eines Experiments ist natürlich die Möglichkeit von Messungen. Bei einer Simulation sind hier im Vergleich zu einem realen Set-Up sehr große Freiheiten gegeben. So können unter Kenntnis der verwendeten Modelle alle relevanten Systemgrößen des Fahrzeugs geloggt (aufgezeichnet) werden.

Einfache
Messung
relevanter
Größen

³Der Hautleitwert (vgl. Skin Conductance Level SCL) gibt die Leitfähigkeit der Haut an. Aus der Änderung der Hautleitfähigkeit kann der sogenannte SCR (Skin Conductance Response) abgeleitet werden.

Der verwendete Simulator bietet hierfür die Möglichkeit, beliebige Größen aus dem Simulationsmodell in einem Textdokument zu speichern. Somit können nach der Simulation sehr leicht Auswertungen des Tests durchgeführt werden.

KAPITEL 6

Ergebnisse unter Berücksichtigung des realen Fahrers

In den folgenden Abschnitten wird der aufgebaute Simulator als Werkzeug zur Bewertung einer verhärteten Lenkung verwendet. Dabei werden die beschriebenen Methoden und Werkzeuge eingesetzt, um sowohl objektive als auch subjektive Bewertungen zu erhalten. Der Simulator eignet sich im besonderen Maß, die individuelle Wahrnehmung des Testszenarios durch die Probanden zu erfassen und zu analysieren.

6.1 Versuchsanordnung

Die Simulationen zum „Durchlenken im Stand“ (vgl. Kap. 4) haben gezeigt, dass ein geeignetes Bordnetzmanagementsystem dabei eine Verhärtung der Lenkung effektiv verhindern kann. Zudem hat eine Versuchsreihe am Simulator ergeben, dass eine Lenkungsverhärtung nur dann wahrgenommen werden kann, wenn diese über eine gewisse Zeit anhält. Die Versuchsanordnung sowie die Ergebnisse hierzu sind in Anhang B.1 dokumentiert. Daher wird im Weiteren der Fokus auf die Lenkungsverhärtung beim Spurwechselmanöver gelegt.

Der im Kapitel 5 vorgestellte Fahrsimulator wird dazu verwendet, die Probanden in ein möglichst realistisches Szenario zu versetzen. Nach einer ca. 10-15 minütigen

Eingewöhnungsphase im Simulator erhält der Proband die Aufgabe, wiederholt den doppelten Spurwechsel entsprechend Kapitel 4 zu durchfahren.

Mehrere Durchläufe

Hierbei werden zwei Simulationsdurchgänge mit jeweils 7 Fahrten durchgeführt. Einer der Durchgänge simuliert eine optimal funktionierende EPS. Der Fahrer erhält also die volle geforderte Lenkunterstützung¹. In einem zweiten Durchgang wird dann zufällig bei einer der Wiederholungen ein stark belastetes elektrisches Bordnetz simuliert, so dass die Lenkunterstützung wegfällt. Dies wird entsprechend der in Kapitel 4 gezeigten Ergebnisse gemacht. Aus Gründen einer besseren Auswertbarkeit und vor allem der Reproduzierbarkeit des kompletten Simulatortests wird dabei die Lenkung gezielt beim Durchfahren der 2. Gasse im Spurwechselmanöver bei $^Ex^V = 310$ m in ihrer Leistung beschränkt. Dadurch kann vermieden werden, dass es unter Umständen je nach Fahrweise des Probanden zu keiner Verhärtung der Lenkung kommt, oder diese zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Spurwechsel auftreten, was eine geeignete Auswertung gefährden könnte. Das so resultierende erhöhte Handmoment liegt in der in Kapitel 4 ermittelten Größenordnung von ca. 10 Nm (vgl. Abb. 6.3). Die Durchgänge werden in ihrer Reihenfolge geändert, so dass Lerneffekte eines Probanden im Mittel keinen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben.

Messungen während des Versuchs

Während der einzelnen Fahrten wird neben dem Handmoment T_L die Position des Fahrzeugs ($^Ex^V, ^Ey^V$), das Interbeat-Intervall (IBI) des Fahrers sowie die Änderung seines Hautleitwerts (SCR) erfasst. Auf diese Weise kann bestimmt werden, wie sich die Spurführung bei plötzlichem EPS-Ausfall² ändert und ob dies Auswirkungen auf die physische Situation des Fahrers hat. Ziel der Messungen und Auswertungen ist es zu untersuchen, ob es zu einer systematischen Änderung der körperlichen Reaktion eines Fahrers zwischen den Manövern mit und ohne Lenkunterstützung kommt und vor allem ob sich die Spurführungsfähigkeit eines Probanden nachweislich verändert.

Fragebögen

Neben diesen Messungen werden die bereits erwähnten Fragebögen dazu verwendet, die Einschätzung des Fahrers im jeweiligen Szenario zu ermitteln. Nach jedem der beiden Durchläufe wird jeweils ein Fragebogen (vgl. Tab. B.4) ausgefüllt. Diese geben Aufschluss über das subjektive Empfinden eines Probanden während der Testläufe.

¹Diese kann, wie im Kapitel 4 gezeigt wird, bei manchen Kombinationen aus Fahrzeug und Lenkbewegung auch bei stabilem Bordnetz nicht geliefert werden. Hier wird das Set-Up allerdings so gewählt, dass eine leichtgängige Lenkung ermöglicht wird.

²Streng genommen handelt es sich nicht um einen Ausfall der EPS, sondern lediglich um eine ungewollte Leistungsbeschränkung wie in Kapitel 4 beschrieben. Das den Simulationen zugrunde liegende Fahrzeug würde bei einem Komplettausfall der EPS von einem Normalfahrer nicht mehr kontrollierbar sein. Trotzdem wird hier der Einfachheit halber von EPS-Ausfall gesprochen.

6.2 Stichprobe

Das Experiment ist mit einer heterogenen Gruppe von 38 Probanden durchgeführt worden. 16 der Probanden waren weiblich und 22 männlich. Das Alter variierte zwischen 21 und 83 Jahren. Die jährliche Fahrleistung, welche als Maß für den „Trainingsstand“ eines Probanden herangezogen werden kann, lag in der betrachteten Gruppe zwischen 2 000 km und 40 000 km. Die gesamte Stichprobe repräsentiert damit einen guten Querschnitt deutscher Autofahrer. Die genaue Zusammensetzung der Probandengruppe kann Tabelle B.2 entnommen werden.

heterogene
Gruppe

6.3 Ergebnisse der Befragung

Die Ergebnisse der Befragung der einzelnen Probanden entsprechend Tabelle B.4 geben Aufschluss über die subjektive Bewertung der Lenkung in den einzelnen Testläufen. Dazu wird die Befragung zweimal durchgeführt, jeweils nach dem Durchgang mit voller EPS-Unterstützung und nach einem Testdurchlauf in dem eine Lenkungsverhärtung spürbar war. Die Ergebnisse der Befragung sind in Abbildung 6.1 zu sehen.

subjektive
Bewertung

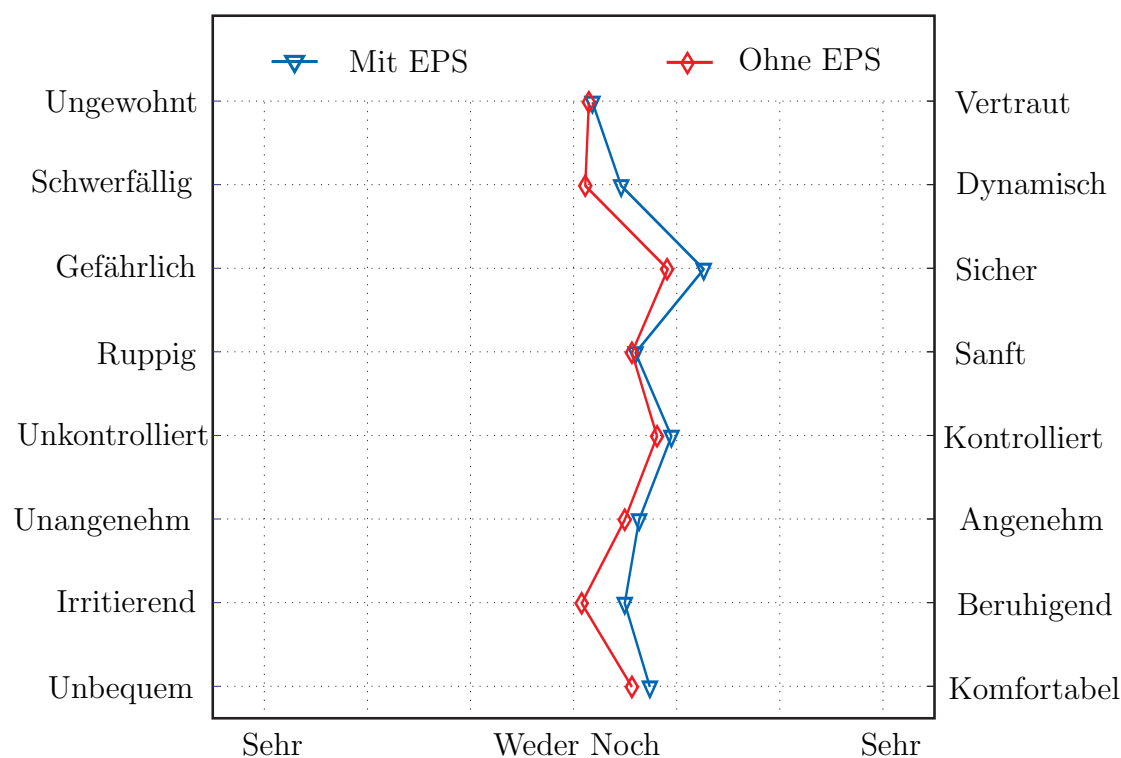


Abbildung 6.1: Mittelwert aller subjektiven Probandenbewertungen (Skalen zur Darstellung sortiert nach negativen und positiven Implikationen)

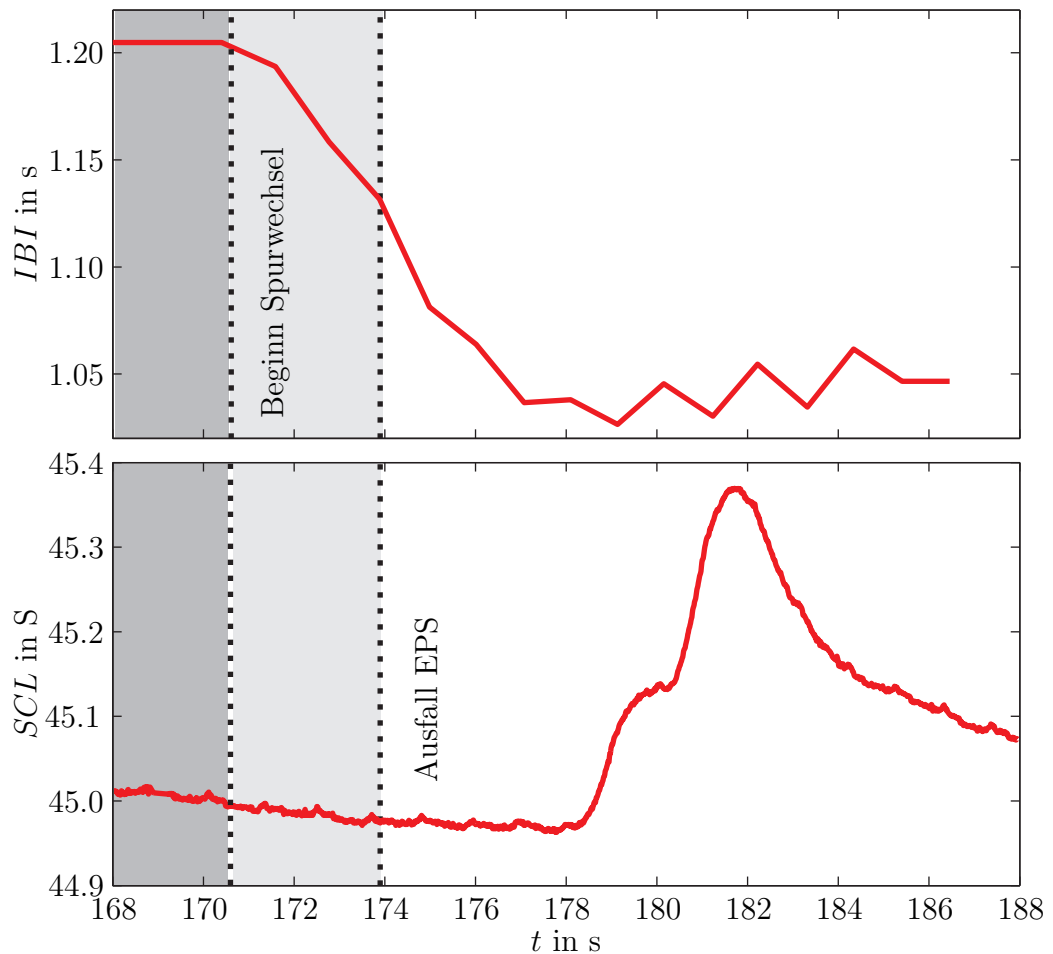


Abbildung 6.2: Beispielmessung des Interbeatintervalls (oben) und des Hautleitwerts (unten) während eines Spurwechselmanövers

EPS Ausfall wird negativ bewertet

In Abbildung 6.1 sind die Mittelwerte über alle Probanden aufgetragen. Diese zeigen deutlich, dass der Ausfall der EPS insgesamt als eher irritierend und gefährlich gesehen wird. Zudem antworten mehr als 70 % der Probanden auf die Frage, ob ihnen etwas ungewöhnliches aufgefallen ist, dass die Lenkung in einem Durchlauf „komisch“, „anders“ oder „sehr schwer“ war. Dies zeigt deutlich, dass die veränderte Lenkung trotz der für die meisten Probanden ungewohnten Aufgabe und Umgebung deutlich wahrgenommen und dementsprechend bewertet wurde.

6.4 Vegetative Effekte

Vergleich der vegetativen Reaktion

Während des gesamten Simulatorversuchs werden die kardioelektrische und die elektrodermale Aktivität jedes Probanden gemessen. Diese werden für zwei Spurwechselmanöver gezielt ausgewertet. Zum einen wird das Manöver mit überhöhtem

Lenkmoment (also ausgefallener EPS) genau betrachtet. Zum anderen wird ein reguläres Spurwechselmanöver (mit funktionierender EPS) zufällig herausgegriffen und analysiert. Dieses Manöver wird so gewählt, dass es bei der Hälfte der Probanden vor dem Manöver ohne EPS-Unterstützung und bei der anderen Hälfte danach liegt. Etwaige Lernprozesse, welche zu einer systematischen Abweichung der körperlichen Reaktion beim Spurwechsel führen können, werden somit weitgehend ausgeschlossen.

Ausgewertet werden die Messungen für einen Zeitraum von ca. 2 s vor Eintritt in die erste Pilonengasse bis jeweils ca. 1-2 s nach Durchfahren des letzten Gasse. Eine Beispielmessung des Hautleitwertes *SCL* sowie des Interbeatintervalls *IBI* kann in Abbildung 6.2 gesehen werden.

Beispielauswertung

Abbildung 6.2 zeigt eine Beispielmessung mit Ausfall der EPS. Es kann gesehen werden, dass die EPS erst während des Spurwechsels deaktiviert wird. Damit entspricht das Verhalten in etwa dem simulierten Verhalten aus Abbildung 4.11.

Sowohl das Interbeatintervall als auch der Hautleitwert ändern sich als Folge des gefahrenen Manövers in der gezeigten Beispielmessung deutlich. Beide Werte deuten auf eine starke Aufmerksamkeitssteigerung und Alarmierung des Probanden hin. Auffällig für die Kurve der Hautleitfähigkeit ist, dass es erst einige Sekunden nach dem Stimulus zu einer messbaren Veränderung des gemessenen Hautleitwerts kommt. Diese Verzögerung ist normal und liegt im Mittel zwischen 2-4 s. Die messbare leicht erhöhte Schweißproduktion tritt verzögert nach dem zugrunde liegenden Reiz ein. Ausgewertet werden kann neben der Veränderung der gezeigten Werte über eine Messung aber vor allem der Vergleich dieser Werte zwischen einer Messung mit und einer ohne EPS. Dieser Vergleich gibt Aufschluss darüber, ob es durch den Ausfall der EPS zu einer systematischen Änderung kommt.

6.4.1 Kardiovaskuläre Reaktion

Die Analyse sämtlicher Messungen ergibt, dass ein Spurwechselmanöver zu einer deutlichen Verkürzung des *IBI* führt. Dies kann sowohl bei Spurwechselmanövern mit und ohne EPS beobachtet werden. Vor dem Hintergrund, dass die wenigsten der Probanden zuvor bereits ein Spurwechselmanöver in der Realität oder in einem Simulator gefahren sind, ist dies auch nicht weiter verwunderlich. Die Aufgabe stellt die Probanden vor eine Herausforderung, die naturgemäß zu einer deutlichen Erhöhung der Reaktionsbereitschaft während des Manövers führt. Hinzu kommt eine teilweise schnelle Lenkbewegung, welche aufgrund der körperlichen Aktivität alleine bereits zu einer Aktivierung des kardiovaskulären Systems führt.

Ergebnisse *IBI*

Zu untersuchen ist daher insbesondere, ob es zwischen den Fahrten mit und ohne EPS zu einer systematischen Abweichung der *IBI*-Änderung kommt. Tabelle 6.1 zeigt den Mittelwert der Änderung des *IBI* $\overline{\Delta_{IBI}}$ über alle Probanden sowie die Standardabweichung der Einzelmessungen σ und die Standardabweichung des Mittelwerts σ_{mittel} .

	$\overline{\Delta_{IBI}}$	σ	σ_{mittel}
Messung mit EPS	- 0,075 s	0,059 s	0.0096 s
Messung ohne EPS	- 0,107 s	0,083 s	0,0135 s

Tabelle 6.1: Ergebnis der Messung des *IBI* während der Simulatorstudie

Die Differenz der ermittelten Werte lässt darauf schließen, dass es beim Ausfall der EPS zu einer weiteren Aktivierung des kardiovaskulären Systems kommt. Ob dies direkt mit einer unbewussten Beurteilung der Lenkung zusammenhängt oder eher mit dem erhöhten Kraftaufwand zu begründen ist, kann an dieser Stelle nicht abschließend entschieden werden.

6.4.2 Elektrodermale Reaktion

Ergebnisse *SCR*

Ebenso wie die kardiovaskuläre Reaktion der Probanden zeigt auch die elektrodermale Reaktion eine deutliche Veränderung während der Spurwechselmanöver. Im Durchschnitt kommt es sowohl beim Spurwechsel mit EPS also auch beim Manöver ohne EPS zu einer deutlichen Änderung des Hautleitwertes \overline{SCR} . Tabelle 6.2 fasst die vorgenommenen Messungen zusammen.

	\overline{SCR}	σ	σ_{mittel}
Messung mit EPS	3,47 μ S	3,37 μ S	0,55 μ S
Messung ohne EPS	3,97 μ S	5,51 μ S	0,89 μ S

Tabelle 6.2: Ergebnis der Messung der elektrodermalen Aktivität

Entsprechend Tabelle 5.2 kann aufgrund einer gemessenen Änderung des Hautleitwerts von 1-5 μ S auf eine erhöhte Aufmerksamkeit der Probanden während des Tests geschlossen werden. Nach FREY entspricht die Aufmerksamkeitssteigerung allerdings nicht dem Niveau, das bei einem Schreck oder einer gefühlten Gefahr zutage treten würde.

Die Tests mit EPS Wegfall zeigen im Vergleich zu denen mit Lenkunterstützung einen leicht erhöhten Anstieg des *SCR*-Wertes. Dies lässt darauf schließen, dass das Lenkmanöver ohne EPS-Unterstützung die Aufmerksamkeit durchaus erhöht.

Es kann demnach festgehalten werden, dass die Spurwechselmanöver die Aufmerksamkeit des Fahrers anscheinend erhöhen. Der Wegfall der Servolenkung scheint die Größenordnung der vegetativen Effekte zusätzlich zu erhöhen. Dies zeigt eine unterbewusste Reaktion des Fahrers auf die veränderte Lenkung an. Die Messungen der vegetativen Reaktionen decken sich somit mit den Ergebnissen der Befragung.

6.5 Fahrzeugmessungen

Die Messungen vegetativer Effekte sowie die Befragung der Probanden gibt Aufschluss darüber, ob sich eine bewusste oder auch unterbewusste veränderte Bewertung der Lenkung durch die Verhärtung der Lenkung ergibt. Das Gefühl des Fahrers kann allerdings nur sehr begrenzt dazu genutzt werden, um zu entscheiden, ob es zu einer sicherheitsrelevanten Situation kommt, wenn die volle Unterstützung der EPS nicht gewährleistet ist. Dazu müssen die gefahrenen Bahnen betrachtet werden.

Der Proband versucht entsprechend seiner Fahraufgabe das Fahrzeug durch die markierten Pilonengassen zu bewegen. Dabei wird jeweils für zuvor definierte äquidistante ${}^E x^V$ der entsprechende Wert für ${}^E y^V$ sowie das benötigte Handmoment T_L gemessen. In Abbildung 6.3 kann dieses Handmoment T_L während der Einzelfahrten beider Durchgänge beispielhaft für einen Probanden betrachtet werden.

Die Einzelmessungen des Handmoments $\mathbf{T}_{L,i}$ zeigen, dass der Proband wiederholt eine sehr ähnliche Lenkbewegung durchführt. Die Amplitude des benötigten Handmoments zeigt über die verschiedenen Fahrten keinerlei signifikante Veränderung. Die Messung des Handmoments $\mathbf{T}_{L,EPS}$ bei leistungsbegrenzter (ausgefallener) EPS zeigt allerdings eine deutliche Erhöhung auf bis zu 10 Nm.

Wiederholte
ähnliche Bahn

Bei dieser so deutlichen Veränderung des benötigten Handmoments T_L stellt sich zwangsläufig die Frage, ob die Fähigkeit des Fahrers gezielt durch die vorgegebenen Gassen zu fahren beeinträchtigt wird. Die gemessenen Positionen $({}^E x^V, {}^E y^V)$ der i -ten Fahrt des n -ten Probanden werden im Folgenden als \mathbf{P}_i^n bezeichnet. Abbildung 6.4 zeigt beispielhaft den Bahnverlauf aller Einzelmessungen desselben Probanden.

Leistungs-
begrenzung
EPS

Zu Zwecken der statistischen Auswertung wird aus den Punktefolgen der k Einzel-

Mittlere Bahn

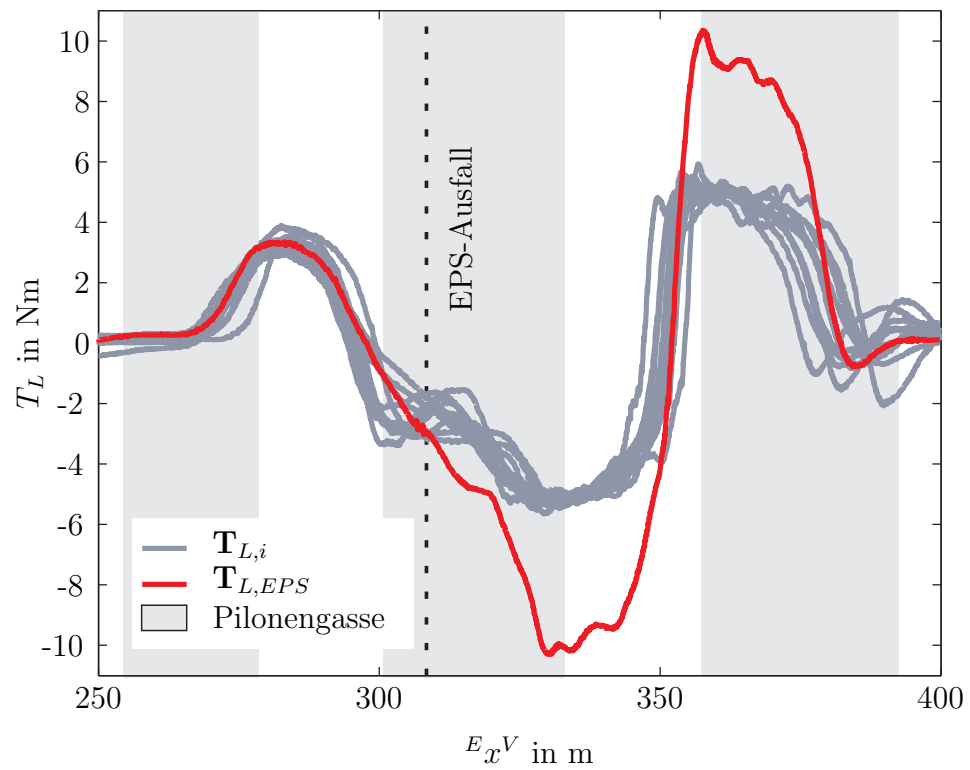


Abbildung 6.3: Handmoment während des Manövers für einen ausgewählten Probanden

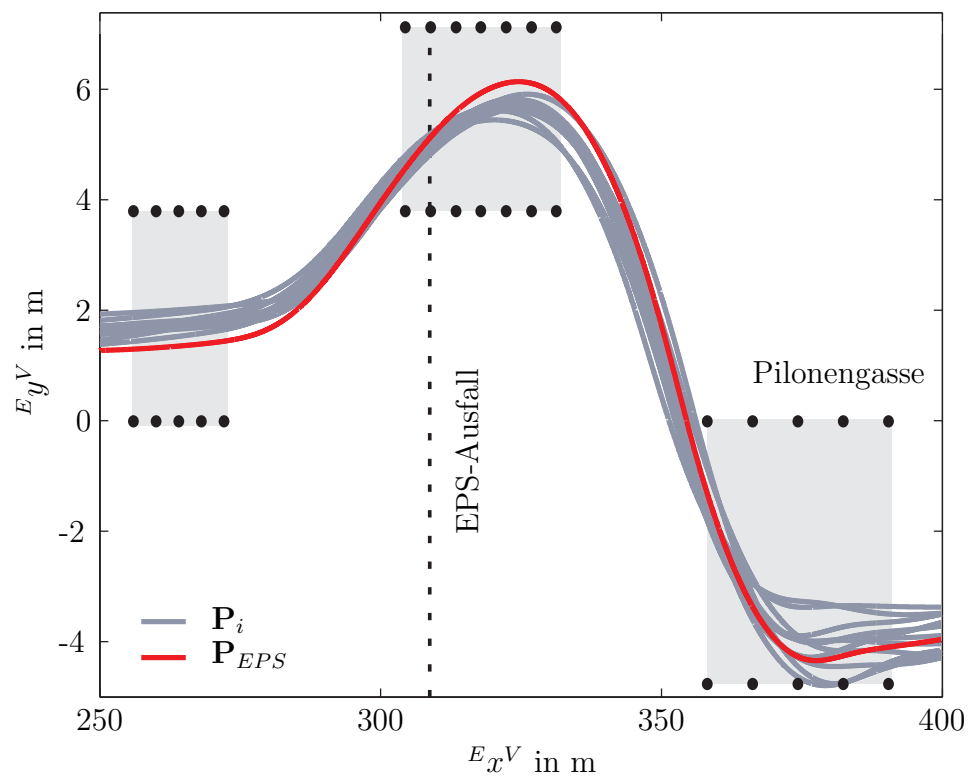


Abbildung 6.4: Gefahrene Trajektorie für einen ausgewählten Probanden

fahrten \mathbf{P}_i^n die mittlere Bahn $\overline{\mathbf{P}}^n$ des n-ten Probanden berechnen. Für die mittlere Bahn eines Probanden kann das arithmetische Mittel

$$\overline{\mathbf{P}}^n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{P}_i^n \quad (6.1)$$

als Funktion über der Fahrzeugposition in $^Ex^V$ -Richtung gebildet werden. Als Maß für die Streuung der Einzelfahrten um die mittlere Bahn kann die Standardabweichung verwendet werden.

$$\sigma_r^n = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\Delta P_{i,r}^n)^2} \quad (6.2)$$

$\overline{\mathbf{P}}^n$	Punktefolge als Repräsentation der mittleren Bahn aller Einzelmessungen des n-ten Probanden
\mathbf{P}_i^n	Punktefolge der i-ten Einzelfahrten des n-ten Probanden
k	Zahl aller Einzelmessungen für einen Probanden
r	Index der Bahnpunkte
σ_r^n	Standardabweichung der Einzelfahrten des n-ten Probanden am Punkt r
$\Delta P_{i,r}^n$	minimaler Abstand zwischen dem r-ten Punkt der Bahn \mathbf{P}_i^n zur mittleren Bahn $\overline{\mathbf{P}}^n$

Mit Hilfe von σ^n kann bei einer Abweichung zwischen der mittleren Bahn und der Bahn ohne EPS $\Delta \mathbf{P}_{EPS}^n$ bewertet werden, ob diese Abweichung in dem ohnehin üblichen Maß für den jeweiligen Probanden liegt. Die Abbildung 6.5 zeigt die mittlere Bahn des Beispielprobanden sowie die hierzu ermittelte Standardabweichung und die gefahrene Bahn bei ausgefallener EPS \mathbf{P}_{EPS}^n . Es ist zu sehen, dass bei diesem Probanden die Bahn ohne EPS bereits vor dem EPS-Ausfall deutlich aus dem σ -Bereich herausfällt. Auch in der zweiten Pilonengasse sowie im Übergang zwischen der zweiten und dritten Gasse liegt die gefahrene Bahn außerhalb der σ -Umgebung. In der dritten Gasse liegt die Bahn ohne EPS zwar weiterhin deutlich neben der mittleren Bahn. An dieser Stelle ist die Standardabweichung aller übrigen Bahnen (Streuung) jedoch so groß, dass hier die Abweichung kleiner als σ ist.

Ermittlung
Abweichung
durch
EPS-Ausfall

Noch klarer ist dies in Abbildung 6.6 zu sehen, in der die Abweichung von der mittleren Bahn $\Delta \mathbf{P}_{EPS}$ sowie die Standardabweichung σ (und deren doppelter Wert) als Funktion von $^Ex^V$ dargestellt sind.

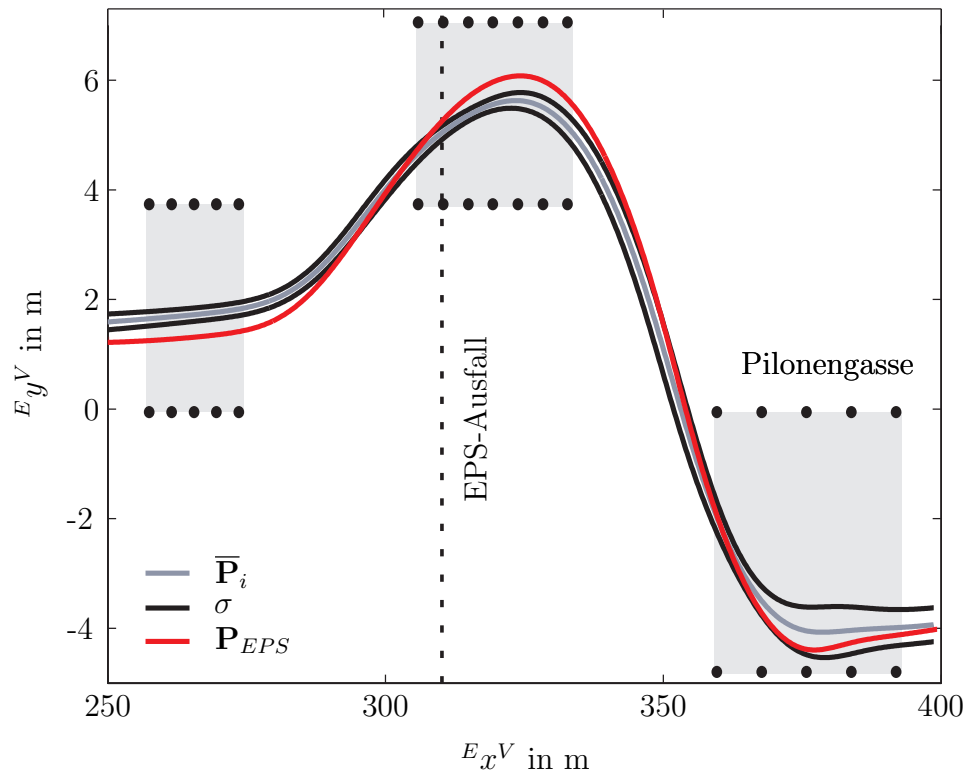


Abbildung 6.5: Auswertung Mittelwert und Standardabweichung

Bahnänderung
bei Ausfall EPS?

Anhand eines solchen Vergleichs kann für den jeweiligen Probanden untersucht werden, ob es für die Trajektorie mit Lenkungsverhärtung zu einer Veränderung im Vergleich zu den übrigen Bahnen kommt. Dies könnte ein Indikator dafür sein, dass die Aufgabe des Fahrers, das Fahrzeug entsprechend einer Bahn zu führen³, sich ändert.

Auswertung
zweigeteilt

Die Auswertung der gesamten Stichprobe bezüglich der Spurführungsfähigkeit der Probanden wird in zwei Schritten vorgenommen. Zunächst wird betrachtet, ob es generell zu einer Verschlechterung der Spurführungsfähigkeit nach dem Ausfall der EPS kommt. Danach werden dann die individuellen Bahnen der Einzelprobanden analysiert, um eine detaillierte Aussage bezüglich der Spurführungsfähigkeit zu machen. Dabei stellt sich die Frage, ob eine gemessene Abweichung vom Mittelwert eines Probanden eine signifikante Größenordnung hat. Für das „Bestehen“ des Spurwechselmanövers in der Realität wäre die Abweichung dann relevant, wenn durch sie Pilonen umgeworfen würden. Im Rahmen dieser Untersuchung kann dieses Kriterium nicht angewendet werden, da die Probanden im Simulator auch unter Normalbedingungen nur sehr selten durch die geforderten Pilonengassen fahren ohne diese dabei zu berühren. Es kann daher nur die relative Veränderung

³Die Aufgaben des Fahrers können nach DONGES [29] in die drei Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung unterteilt werden.

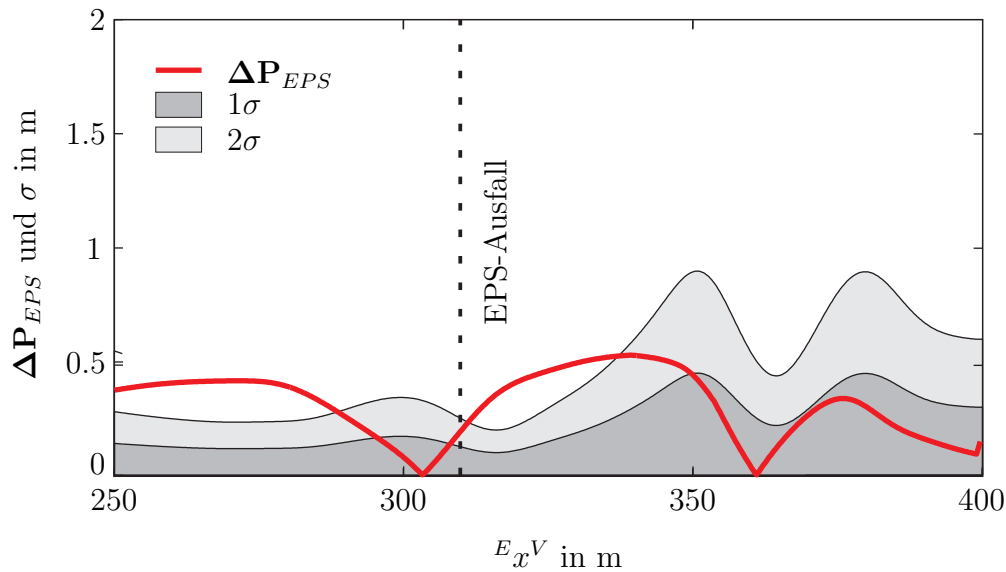


Abbildung 6.6: Vergleich zwischen Abweichung von der mittleren Bahn eines Probanden sowie der entsprechenden Standardabweichung

der Fahrfähigkeit beim Ausfall der EPS analysiert werden. Daher werden hier die Standardabweichung σ sowie die zweifache Standardabweichung 2σ der gemittelten Bahn eines Probanden dazu herangezogen, eine Aussage über die Änderung der Spurführungsfähigkeit zu machen.

Wird der Mittelwert der Abweichung bei EPS-Ausfall über alle Probanden $\overline{\Delta P}_{EPS}$ bestimmt, so kann dieser mit der ebenfalls gemittelten Standardabweichung $\bar{\sigma}$ verglichen werden. Dieser Vergleich lässt eine Aussage darüber zu, ob es an einer bestimmten Stelle des Spurwechselmanövers zu einer signifikanten Verschlechterung der Spurführungsfähigkeit aufgrund des EPS Ausfalls kommt. Abbildung 6.7 zeigt diesen Vergleich.

Der Verlauf der gemittelten Standardabweichung $\bar{\sigma}$ zeigt einen sehr charakteristischen Verlauf, der über nahezu alle Probanden zu erkennen war. Im Bereich der ersten Gasse ist eine relativ kleine Abweichung zwischen den Einfahrten zu sehen. Diese führen zu der dargestellten relativ geringen Standardabweichung zu Beginn des Manövers. Die Streuung zwischen den Einfahrten steigt auch in der zweiten Gasse nur sehr leicht an. Der Übergang von der ersten in die zweite Gasse ist auch für ungeübte Fahrer in dem gewählten Versuchsaufbau sehr gut zu bewältigen. Daraus ergibt sich die Ähnlichkeit der Bahnen in diesem Bereich. Nach der zweiten Pilonengasse müssen die Probanden, um die dritte Gasse kollisionsfrei zu durchfahren, im Vergleich hierzu starke Lenkbewegungen ausführen. Für die Art des Einlenkens und auch den Punkt, an dem das Einlenken beginnt, kommt es dadurch zu größeren Unterschieden. Diese spiegeln sich in der Überhöhung der Standardabweichung bei $E_x^V = [350\ 360]$ m wieder. Da alle Probanden versuchen,

Streuung der
Einzelfahrten

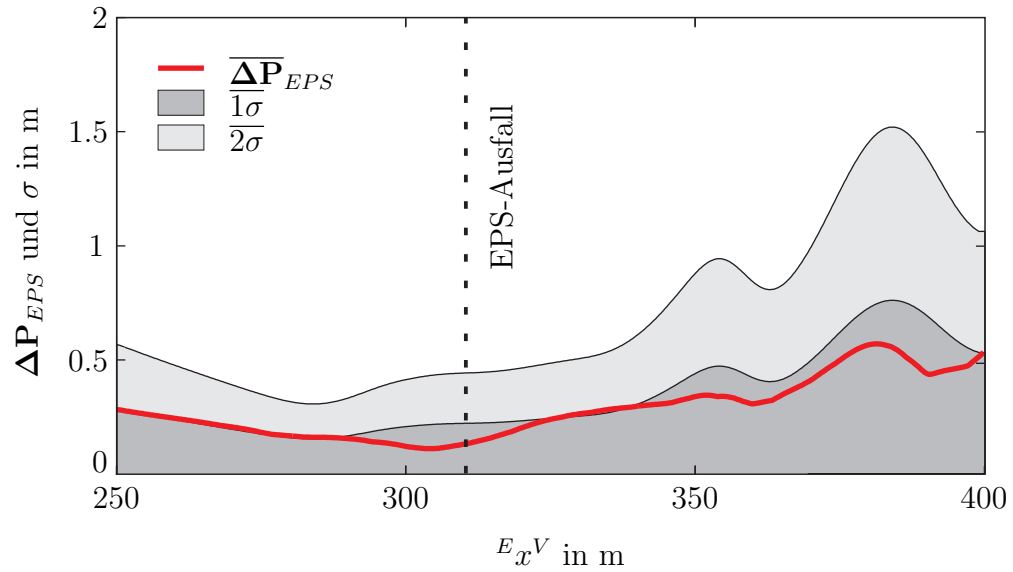


Abbildung 6.7: Standardabweichung $\bar{\sigma}$ aller Einfahrten bei optimaler Lenkunterstützung und gemittelter Fehler $\overline{\Delta P}_{EPS}$ beim Ausfall der Servolenkung

an einer ähnlichen Stelle in die dritte Gasse einzufahren, kommt es danach zwischen zweiter und dritter Gasse zu einer Verringerung der Streuung. In der dritten Gasse fällt es den meisten Probanden dann allerdings aufgrund der starken Lenkbewegungen im Vorfeld und der ungewohnten Situation sehr schwer, das Fahrzeug in einer reproduzierbaren Spur zu halten. Dies führt zu der gut erkennbaren Überhöhung der gezeigten Kurve für die Standardabweichung bei ca. $E_{x^V} = 375$ m.

Mittlerer Fehler zeigt keine Veränderung ohne EPS

Die Abbildung 6.7 zeigt deutlich, dass die Standardabweichung beim Ausfall der EPS nahezu der gemittelten Standardabweichung über alle Normalfahrten entspricht. Dies lässt den Schluss zu, dass sich keine Häufung eines Fehlers an einer Position E_{x^V} aufgrund des EPS-Ausfalls ergibt. Es kann gefolgert werden, dass sich bei der plötzlichen Veränderung der Lenkung, welche bei $E_{x^V} = 310$ m auftritt, keine direkt aus dieser Veränderung abzuleitende Bahnänderung ergibt. Die Probanden scheinen demnach nicht derart überrascht, dass es z. B. zum Verreißen des Lenkrads führt. Wenn dem so wäre, dann müsste der gemittelte Fehler nach dem Ausfall der EPS zumindest stellenweise über dem Wert von $\bar{\sigma}$ liegen.

Die Bildung eines Mittelwerts des Fehlers über alle Probanden kann jedoch auch dazu führen, dass Effekte durch eben diese Mittelung verschleiert werden. Deshalb wird zusätzlich betrachtet, wie gut die einzelnen Probanden entsprechend ihrer mittleren Bahn fahren.

Signifikante Abweichung

Hierzu wird entsprechend einschlägiger Literatur aus dem Bereich der Statistik [11, 65] ausgewertet, ob eine Messung den 2σ -Bereich verlässt. Der sogenannte 2σ -

Bereich stellt einen Bereich um den Erwartungswert (hier der Mittelwert) dar, in dem 95 % aller Messungen liegen. Liegt eine Messung außerhalb dieses Bereichs, so wird dies entsprechend LOHNINGER [65] als signifikante Abweichung angesehen. Im Rahmen dieser Auswertungen werden die Werte für σ für einzelne Messpunkte $E_{x_r}^V$ bestimmt. Ein Verlassen des 2σ -Bereichs ist somit „lediglich“ eine signifikante Abweichung an der jeweiligen Stelle und bedeutet nicht, dass die gesamte Bahn signifikant von der mittleren Bahn abweicht. Es kann allerdings eine Häufigkeit für das Verlassen dieser Umgebung ermittelt werden. Der Vergleich dieser Verlassenshäufigkeit mit und ohne EPS kann dann zur weiteren Analyse herangezogen werden.

Die Analyse der maximalen Abweichung $\text{Max}(\Delta \mathbf{P}_{EPS})$ der Bahn ohne EPS \mathbf{P}_{EPS}^n zur jeweiligen mittleren Bahn $\bar{\mathbf{P}}^n$ zeigt, dass die Probanden in 35 % der Fahrten den 2σ -Bereich verlassen. Die Auswertung der einzelnen Probanden hinsichtlich der Abweichungen von der jeweiligen mittleren Bahn sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Analyse
maximale
Abweichung

	Prozentualer Anteil der Probanden
$\text{Max}(\Delta \mathbf{P}) > 2\sigma$	33 %
$\text{Max}(\Delta \mathbf{P}_{EPS}) > 2\sigma$	35 %

Tabelle 6.3: Prozentualer Anteil der Probanden mit maximaler Abweichung von ihrer mittleren Bahn von mehr als 2σ

Der prozentuale Anteil der Probanden, welcher nach dem Ausfall der EPS mehr als 2σ von der mittleren Bahn abweicht, erscheint mit 35 % recht hoch. Dies legt den Schluss nahe, dass der Ausfall der EPS tatsächlich die Spurführungsfähigkeit der Probanden negativ beeinflusst. Bei einer genaueren Analyse der entsprechenden Probanden stellt sich allerdings heraus, dass die maximalen Abweichungen nur von sehr geringer Dauer sind und meist nicht an Stellen auftreten, in denen eine besonders heftige Lenkbewegung stattfindet. Zudem kann oftmals beobachtet werden, dass die Versuchsläufe der Probanden mit hohen Abweichungen schon vor dem Spurwechselmanöver starke Unregelmäßigkeiten aufweisen. Zudem ist der Anteil der Fahrten in dem die Probanden auch bei optimaler Lenkunterstützung den 2σ -Bereich verlassen ist mit 33 % nur sehr geringfügig kleiner. Somit ist es weiter insgesamt sehr fraglich, ob wirklich die verhärtete Lenkung als Ursache für die Änderung der Spur angeführt werden kann. Es ist eher davon auszugehen, dass die verhärtete Lenkung keine messbare Verschlechterung der Spurführung bedingt.

Häufigkeit
Verlassen 2σ

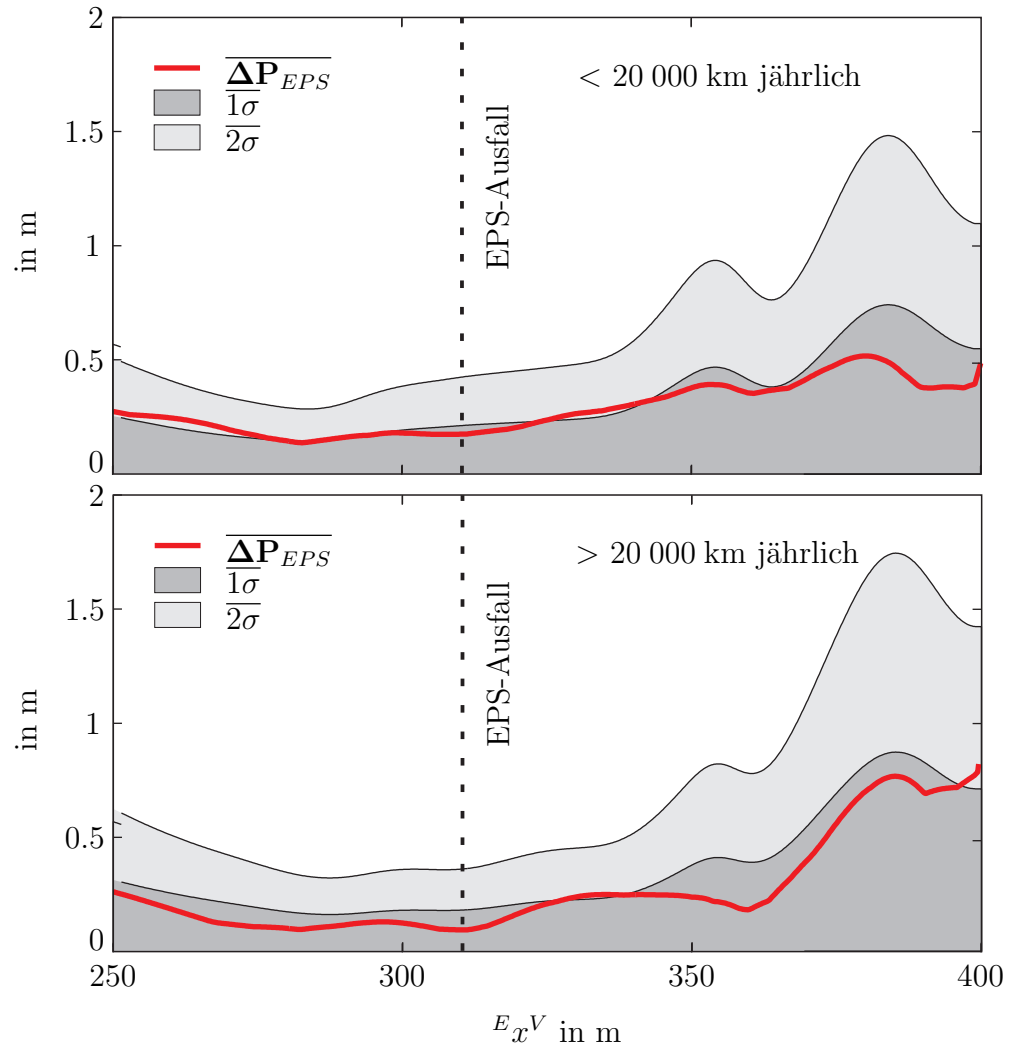


Abbildung 6.8: Gemittelter Fehler aufgrund des EPS Ausfalls und gemittelte Standardabweichung für Probanden mit einer jährlichen Fahrleistung von weniger als 20 000 km (oben) und mehr als 20 000 km (unten)

6.6 Auswertung nach personenbezogenen Merkmalen

Trennung nach Fahrleistung

Im Bezug auf das Spurführungsvermögen und den Einfluss der EPS auf dieses ist es interessant, die Gruppe der Probanden anhand ihrer jährlichen Fahrleistung zu kategorisieren. Hier werden zwei Gruppen aus den Probanden gebildet. Die Vielfahrer mit mehr als 20 000 km jährlicher Fahrleistung und die Probanden mit weniger als 20 000 km jährlicher Fahrleistung.

Die Fähigkeit der Spurführung wird dann für diese beiden Gruppen entsprechend der Auswertungen für die gesamte Stichprobe durchgeführt.

Abbildung 6.8 zeigt den gemittelten Fehler beim EPS-Ausfall $\overline{\Delta \mathbf{P}}_{EPS}$ für die beiden Gruppen im Vergleich zur gemittelten Standardabweichung $\overline{1\sigma}$. Wie bereits bei der Auswertung der gesamten Stichprobe ist deutlich erkennbar, dass es zu keiner erkennbaren Häufung von ortsgebundenen Fehlern kommt. Auch ist der auftretende mittlere Fehler nach dem Ausfall der EPS nicht größer als der zu erwartende Wert σ .

Gemittelter Fehler

Die Ergebnisse aus Abbildung 6.8 legen demnach wiederum den Schluss nahe, dass es zu keinerlei Verschlechterung für die beiden ausgewerteten Personengruppen aufgrund des EPS-Ausfalls kommt. Dies wird nun mit der Häufigkeit des Verlassens der 2σ -Umgebung detaillierter betrachtet. Das Vorgehen ist wiederum analog zu dem bei der Auswertung der gesamten Stichprobe. In Tabelle 6.4 werden diese Häufigkeiten zusammengefasst.

Häufigkeit Verlassen 2σ

Während für die gesamte Stichprobe, wie bereits diskutiert, kein relevanter Anstieg in der Häufigkeit für das Verlassen der 2σ -Umgebung verzeichnet werden konnte, ist dies für die Gruppe der Probanden mit einer jährlichen Fahrleistung von weniger als 20 000 km nicht richtig. Hier kann ein Anstieg von 14 %-Punkten zwischen den Bahnen mit EPS-Unterstützung und denen ohne volle Unterstützung gesehen werden. Der Wert für die Häufigkeit des Verlassens der 2σ -Umgebung bei voller Lenkunterstützung liegt mit 33,8 % nur leicht über dem der gesamten Stichprobe.

Verschlechterung bei Wenigfahrern

	Prozentualer Anteil		
	aller Probanden	Fahrleistung < 20 000 km	Fahrleistung > 20 000 km
$\text{Max}(\Delta \mathbf{P}) > 2\sigma$	33 %	33,8 %	28,8 %
$\text{Max}(\Delta \mathbf{P}_{EPS}) > 2\sigma$	35 %	47,8 %	25 %

Tabelle 6.4: Prozentualer Anteil der Probanden mit maximaler Abweichung von ihrer mittleren Bahn von mehr als 2σ mit Einteilung nach der jährlichen Fahrleistung in km

Bei den Probanden, die eine hohe jährliche Fahrleistung haben, kann ein anderer Trend erkannt werden. Diese verlassen bei voller Lenkunterstützung nur in 28,8 % aller gefahrenen Manöver ihre 2σ -Umgebung. Dieses Niveau liegt deutlich unter dem der gesamten Stichprobe und lässt darauf schließen, dass diese Probanden insgesamt kontinuierlicher fahren. Im Vergleich zwischen den Manövern mit Lenkunterstützung und denen bei ausgefallener EPS kann zudem erkannt werden, dass sich der Wert für die Häufigkeit des Verlassens der 2σ -Umgebung von 28,8 % sogar

Keine Veränderung bei Vielfahrern

um 3,8 % auf 25 % verringert. Dies zeigt zumindest an, dass die Probandengruppe der Vielfahrer keine zusätzlichen Schwierigkeiten bei der Spurführung haben, wenn die EPS nicht die gewohnte volle Unterstützung liefert.

KAPITEL 7

Zusammenfassung und weiterführende Aspekte

Diese Arbeit diskutiert verschiedene Aspekte des elektrischen Bordnetzes moderner Kfz und identifiziert dabei Herausforderungen sowie Lösungen für diese. Neben der isolierten technischen Betrachtung des Bordnetzes werden Echtzeitmodelle in Verbindung mit einem Fahrsimulator dazu verwendet, die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug, Bordnetz und Fahrer näher zu beleuchten. In diesem Kapitel werden die wesentlichen Aspekte der gesamten Arbeit verkürzt dargestellt und mögliche Anknüpfungspunkte für zukünftige Arbeiten gegeben.

7.1 Zusammenfassung

In der Literatur herrscht der Konsens, dass das klassische 14 V Bordnetz bei modernen Kfz an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit betrieben wird. Kurzfristige Lasten im Bordnetz können nicht abgedeckt werden und es kommt verstärkt zu Leistungsengpässen. Für einige Verbraucher bedeutet dies, dass deren Funktion

Begrenzte
Leistung

in einem solchen Fall nicht oder nur teilweise gewährleistet werden kann. Die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit bestätigen diese Aussage. Die Bordnetzsimulationen (vgl. Kap. 4) zeigen dies deutlich.

Überbelastung
wahrnehmbar

Weiterhin ist gezeigt worden, dass die zeitweise Überbelastung des Bordnetzes nicht alleine ein Problem der Verfügbarkeit oder Funktionsfähigkeit einzelner Systeme ist, sondern bei modernen mechatronischen Systemen (z. B. der EPS) direkt mit dem Fahrer gekoppelt ist. So ist in Kapitel 4 der deutliche Handmomentanstieg beim Parkieren aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit des Bordnetzes zu beobachten.

Energiemanage-
ment kann
bedingt helfen

Die Problematik einer Bordnetzüberbelastung ist keine neue Erkenntnis. Es wird seit einiger Zeit intensiv daran geforscht, wie die knappe Leistung möglichst effizient (optimal) auf die Verbraucher aufgeteilt werden kann. Ausgehend von bestehenden Ansätzen aus der Literatur, die primär die Effizienzsteigerung der Energieverteilung zum Ziel haben, wird in dieser Arbeit ein Energiemanagementalgorithmus vorgestellt, der die sichere Versorgung wahrnehmbarer elektrischer Verbraucher (am Beispiel der EPS) gewährleisten soll. Hierbei sind vor allem die zu erwartenden großen Gradienten der Leistungsaufnahme der EPS eine Herausforderung. Es wird gezeigt, dass die Wahrnehmbarkeit eines Leistungsengpasses durch ein geeignetes Energiemanagementsystem nicht vollkommen verhindert, aber zumindest sehr positiv beeinflusst werden kann, wenn zwangsweise einige Verbraucher (durch eine Notfallschaltung) abgeschaltet werden.

Einbinden des
Fahrers in
Untersuchung

Durch die Echtzeitsimulation des elektrischen Bordnetzes eines Kfz kann die Wechselwirkung zwischen Fahrer und Bordnetz untersucht werden. Handlungen des realen Fahrers resultieren so sofort in einer Zustandsänderung des elektrischen Bordnetzes.

Als Beispielsystem hierfür wird erneut die EPS herangezogen. Die Auswirkung eines EPS-Ausfalls während eines Spurwechselmanövers kann detailliert betrachtet werden. Hierzu kann auf einen Fahrsimulator, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, zurückgegriffen werden, um die Reaktion des Fahrers qualitativ und auch quantitativ zu bewerten. Die durchgeführte Probandenstudie zeigt sowohl das subjektive Fahrerempfinden als auch das objektiv messbare Spurführungsvermögen der Probanden.

EPS Ausfall
störend

Die fehlende Unterstützung der Servolenkung wird von der Mehrzahl der Probanden negativ bewertet. Dies bedeutet, dass eine ausgefallene Servolenkung im Spurwechselmanöver subjektiv als störend oder sogar gefährlich eingestuft wird. Quantifizierbare Messungen der vegetativen Reaktionen der einzelnen Probanden zeigen eine ähnliche Tendenz. Die Messung der gefahrenen Trajektorien decken allerdings auf, dass es zu keiner signifikanten Verschlechterung des Spurführungsvermögens

Keine
Gefährdung
messbar

kommt. Damit wird die veränderte Lenkung subjektiv zwar negativ bewertet, eine wirkliche Gefährdung durch eine messbare Verschlechterung der Spurführungsfähigkeit kann im Mittel über alle Probanden jedoch nicht nachgewiesen werden.

Bei Aufteilung der Probanden in eine Gruppe der Vielfahrer ($>20\,000$ km pro Jahr) und eine Gruppe mit geringerer Fahrleistung ($<20\,000$ km pro Jahr) ergeben sich allerdings Anzeichen, dass die Vielfahrer besser in der Lage sind, die spürbare Veränderung der Lenkung sofort wieder auszuregeln.

Während der Ausfall einer EPS beim Parkieren und die damit verbundene Komforteinbuße nicht tolerierbar ist, da hier alleine die subjektive Bewertung seitens des Fahrers den Ausschlag für eine Bewertung geben muss, kann dies nicht uneingeschränkt für ein Manöver wie das Spurwechselmanöver postuliert werden.

7.2 Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden bestehende Energiemanagementansätze dazu verwendet, kurzfristige Hochstromverbraucher im Bordnetz geeignet mit Energie zu versorgen. Mit den erläuterten Anpassungen und Ergänzungen stellt diese Arbeit daher einen Beitrag zum Energiemanagement des elektrischen Bordnetzes eines Kfz dar.

Erweiterung Energiemanagement

Insbesondere die Echtzeitsimulation des elektrischen Bordnetzes bedeutet eine Erweiterung der Untersuchungsmöglichkeiten heutiger Bordnetze. Die Echtzeitsimulation in einem Simulator ermöglicht die Integration eines realen Fahrers in das Gesamtsystem. Dies kann, wie in dieser Arbeit gezeigt wird, dazu dienen, Systeme und Situationen einer Bewertung unter realen Bedingungen zu unterziehen. Die Integration des Menschen in den Entwicklungsprozess, wie sie schon seit einiger Zeit Standard für menschenzentrierte mechatronische Systeme ist [53], kann so auf Komponenten des elektrischen Bordnetzes erweitert werden. Hierzu bedarf es aufgrund der Echtzeitsimulation keines aufwändigen Aufbaus von Hardware.

Echtzeitsimulation Kfz-Bordnetz

Am Beispiel der EPS wird gezeigt, dass es eine nicht zu vernachlässigende Wechselwirkung zwischen Bordnetz, Fahrzeugdynamik und Fahrer gibt und es werden Methoden zu deren Analyse gezeigt. Die Probandenstudien zeigen, dass hierbei die reine technische Beurteilung eines Systems nicht ausreicht und sich auch die subjektiven Beurteilungen der Fahrer nicht immer mit objektiven Messgrößen decken.

Weiterführende
Untersuchungen
der E-Mobilität
möglich

Die Simulation elektrischer sowie elektromechanischer Komponenten im Kfz wird für weitere Entwicklungen stark an Bedeutung gewinnen. Das gesamte Feld der Elektromobilität¹ wird zwangsläufig dazu führen, dass verstärkt Simulationen dieser Komponenten durchgeführt werden müssen. Gerade der beschriebene Fahr Simulator in Zusammenhang mit den Bordnetzmodellen bietet für diesen Bereich ein großes Entwicklungspotential und kann somit als Basis für Untersuchungen zu artverwandten Themen gesehen werden.

7.3 Zukünftige Arbeiten

Die hier vorgestellten Ergebnisse und Methoden bieten Anknüpfungspunkte für eine Vielzahl weiterer Untersuchungen. Zukünftige Arbeiten können sich ebenso mit der Verfeinerung sowie Optimierung der verwendeten Modelle befassen, als auch die gezeigten Methoden für weitere Untersuchungen aufgreifen. Gerade der modulare Aufbau der gezeigten Modelle eröffnet in diesem Kontext weitreichende Möglichkeiten. Hier werden im Weiteren einige dieser Anknüpfungspunkte beschrieben.

Gesonderte
Untersuchung
Wenigfahrer

Die Analyse der Spurführungsfähigkeit für die Gruppe der Wenigfahrer hat ergeben, dass hier anscheinend eine Veränderung durch den Ausfall der EPS auftritt. Dies sollte in weiteren Studien genauer untersucht werden. Sollte sich herausstellen, dass Wenigfahrer tatsächlich ein vermindertes Spurführungsvermögen bei einer Verhärtung der Lenkung haben, so muss auf dieses in angemessener Weise reagiert werden.

Maximal
fahrbares
Handmoment

Weiterhin wäre es sehr interessant zu untersuchen, welche maximalen Handmomente für eine sichere Spurführung noch akzeptabel sind. Hierbei ist ein deutlicher Unterschied zwischen verschiedenen Probandengruppen zu erwarten. Dabei kann der in dieser Arbeit vorgestellte Versuchsaufbau direkt verwendet werden.

Reale
Versuchsfahrten

Die gezeigten Simulatortests geben bereits einen guten Einblick in das Verhalten eines realen Fahrers in den entsprechenden Situationen. Ob die verhärtete Lenkung allerdings auch in einer realen Fahrsituation als solche erkannt worden wäre, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden. Eine Realsituation, in der ein plötzliches Notausweichen notwendig ist, wird zum einen nicht mehrmals wiederholt, wodurch ein direkter Vergleich des Lenkgefühls nicht möglich wäre. Zum anderen ist davon auszugehen, dass in einer realen Gefahrensituation der Fahrer anders auf Stimuli reagiert als beim Spurwechseltest im Simulator. Entsprechend

¹Zur Elektromobilität werden neben den reinen batterieelektrischen Fahrzeugen Hybridfahrzeuge gezählt, die es ermöglichen, das Fahrzeug rein elektrisch fortzubewegen

der Entwicklungsmethodik mechatronischer Systeme ist daher eine weitere Eigenschaftsabsicherung und Validierung der hier vorgestellten Ergebnisse mit realen Fahrzeugen notwendig. Die vorgestellten Testmanöver eignen sich hierzu in besonderem Maße, da sie auch unter Verwendung realer Fahrzeuge gut reproduzierbar sind und keine wirkliche Gefährdung der Probanden bedeutet.

Der Beitrag der vorliegenden Arbeit liegt vor allem darin, die Wechselwirkung von Fahrer und Bordnetz methodisch zu erfassen. Dabei wurde die EPS als Beispiel herangezogen. Wie bereits diskutiert, gibt es allerdings einige weitere elektromechanische Komponenten, die eine Kopplung zwischen Fahrer und Bordnetz bedingen. Das bereits vorgestellte ESC ist ein solches System. Ebenso können Assistenzsysteme zur Quer- als auch zur Längsführung hinsichtlich ihrer physiologischen Wirkung auf den Fahrer in verschiedenen Situationen methodisch untersucht werden.

Weitere fahrdyna-
mikrelevante
Verbraucher

Zukünftige Entwicklungen im Bereich Elektromobilität

Der in Kapitel 2 bereits diskutierte Trend zur Elektrifizierung wird in den nächsten Jahren anhalten. Die aufgezeigte Entwicklung wird durch den Wunsch der Elektromobilität zudem verstärkt. Neben den Chancen, die diese Entwicklung für die Schaffung neuer Märkte eröffnet [6,7,30], müssen auch die Auswirkungen auf die heutigen Bordnetztopologien und die hiermit verbundenen Herausforderungen diskutiert werden [39].

A.1 Funktionserweiterung durch Elektrifizierung

Wie bereits vielfach diskutiert, wird durch die Elektrifizierung der verschiedenen Fahrzeugkomponenten eine größere Freiheit im Packaging, die oft mit einer Gewichtsreduzierung einhergeht, erreicht. Gerade bei Systemen wie der elektrischen Servolenkung werden zudem neue Funktionen ermöglicht, die mit den klassischen Systemen nicht oder nur schwer umsetzbar sind. Beispiele hierfür sind Spurhalteassistenten, die über ein Rückstellmoment am Lenkrad mit dem Fahrer interagieren [22].

Neue Funktionen
und Freiheiten

Grenzen des
klassischen
Bordnetzes

Die zunehmende Elektrifizierung ergibt die in dieser Arbeit bereits diskutierten Herausforderungen für das klassische Bordnetz. Der stetig steigende Bedarf elektrischer Energie im Kfz bringt bestehende Bordnetze an ihre Grenzen. Wie in Tabelle 2.4 gezeigt, gibt es eine Vielzahl elektrischer Verbraucher in modernen Bordnetzen. Der kumulierte Verbrauch aller dieser Komponenten liegt deutlich über der Leistung des Generators als einzige Energiequelle. Um die Forderung einer ausgeglichenen Ladebilanz aufrecht erhalten zu können, kann eine weitere Elektrifizierung verschiedener Komponenten in Verbindung mit dem klassischen 14 V Bordnetz nur mit geeigneten Energiemanagementsystemen umgesetzt werden.

A.2 Elektromobilität

Elektromobilität
wird gefördert

Der NATIONALE ENTWICKLUNGSPLAN ELEKTROMOBILITÄT DER BUNDESREGIERUNG ([23] 2009) sieht vor, bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen zu realisieren. Auch wenn dieses Ziel von einigen Wissenschaftlern (u. a. DUDENHÖFFER) als nicht realistisch eingeschätzt und zudem teilweise die Förderung seitens der Bundesregierung kritisiert wird [77], wird es durch viele Forschungsprogramme vorangetrieben, so dass davon auszugehen ist, dass die Technik des Elektrofahrzeugs in den kommenden Jahren große Entwicklungssprünge vollziehen wird. Die Elektromobilität bietet nach einhelliger Meinung große Chancen für die deutsche Industrie, sie verlangt jedoch auch nach neuen Lösungen [6, 7, 103].

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl verschiedener Gruppen, welche sich mit sehr verschiedenen Facetten der Elektromobilität beschäftigen. Dennoch stehen einer wirtschaftlichen Markteinführung von elektrisch angetriebenen Kfz weiterhin einige Gründe entgegen. Es bedarf nach GÖTHEL [43] z.B. eines verbesserten Energiemanagements. Die Ford Werke GmbH, die im Verbundprojekt cologneE-mobil im Rahmen der Modellregion Rhein-Ruhr die Elektromobilität erforscht, sieht laut KNOTH [62] noch einige Hürden vor allem in der technischen Entwicklung des Gesamtfahrzeugs.

Bordnetz bedarf
neuer Konzepte

Im Rahmen der batterieelektrischen Fahrzeuge muss das Fahrzeugbordnetz neu überdacht werden. Zwar können weiterhin Komponenten des klassischen 14 V Bordnetzes eingesetzt werden, es ist aufgrund der sehr viel höheren Batteriespannungen jedoch auch leicht möglich, wie auch im Hybridfahrzeug Komponenten bei höherer Spannung zu betreiben. Probleme zu großer Ströme zu einzelnen Komponenten, wie z.B. der elektrischen Lenkung, könnten hiermit umgangen werden. Die Herausforderung, die vorhandene elektrische Energie möglichst optimiert einzusetzen, bleibt jedoch weiterhin bestehen und wird dahingehend verschärft, dass die

elektrischen Verbraucher, wie sie auch im klassischen Pkw eingesetzt werden, die Reichweite eines Elektrofahrzeugs erheblich einschränken [63].

Der Fokus beim Bordnetzbetrieb wird daher in der Zukunft (für Elektrofahrzeuge) nicht mehr auf dem Vorbeugen und Vermeiden kurzfristiger Energiemangelsituationen sondern auf dem möglichst energieoptimierten Zusammenspiel aller Komponenten liegen. Dabei ist auf absehbare Zeit vor allem die Reichweite des Elektrofahrzeugs der entscheidende Faktor [63].

Bereits das Zuschalten einiger weniger Nebenverbraucher limitiert die Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs im NEFZ auf 77 % der normierten Angabe. Werden zudem noch Witterungseinflüsse und ein realistisches Fahrprofil zu Grunde gelegt, so wird laut [63] lediglich eine Reichweite von 47 % der NEFZ-Reichweite erreicht.

Neben der Anpassung der verschiedenen Komponenten an die erhöhte Betriebsspannung wird zudem die sicherheitstechnische Betrachtung der so entstehenden Bordnetzstrukturen von entscheidender Bedeutung sein.

Versuchsreihen am Simulator

In diesem Abschnitt werden die im Laufe der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuchsreihen am Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen erläutert. Dabei wird der Aufbau von Fragebögen, die genaue Versuchsdurchführung sowie Ergebnisse der Einzeltests dokumentiert.

Neben dem in Kapitel 6 ausführlich beschriebenen Versuch wurde eine weitere Probandenstudie durchgeführt. Diese hatte zum Ziel die zeitliche Reizschwelle zu ermitteln ab der ein Fahrer eine Verhärtung der Lenkung spürt.

B.1 Zeitliche Reizschwelle an der Lenkung

Die zeitliche Reizschwelle stellt die Zeitlücke dar, in welcher ein Energiemanagementsystem einen Energiemangel an der EPS auflösen muss, damit der Fahrer diesen nicht wahrnehmen kann. Zusammen mit den in dieser Arbeit diskutierten Möglichkeiten der Prädiktion (Vorausschauhorizont) ergibt sich eine Zeit, die ausreichen muss, das Bordnetz von einem Zustand in einen anderen zu überführen. An dieser Stelle wird der Versuch zur Bestimmung der zeitlichen Reizschwelle im Rahmen dieser Arbeit dokumentiert.

Der Proband im Simulator durchfährt wiederholt ein Szenario. Zur Bewertung der Verzögerungszeiten der EPS wird für den hier beschriebenen Versuchsaufbau ein parkierähnlicher Vorgang gewählt. In diesem kann der Proband seine Aufmerksamkeit auf die Lenkung richten und wird nicht etwa durch andere Reize abgelenkt. Die als normal zu beurteilende Servounterstützung wird dann in verschiedenen Stufen verzögert. Der Proband soll dann nach jedem Durchlauf das Lenkgefühl bewerten. Dazu wird eine Skala entsprechend Tabelle B.1 verwendet.

Testlauf Nr.	normal				ungewöhnlich					störend

Tabelle B.1: Fragebogen zur Ermittlung einer zeitlichen Reizschwelle beim Lenken

Kann Fahrer
einen Zusatand
sensieren?

Die subjektive durch den Fahrer getroffene Bewertung eines Systems geht immer mit der Frage einher, ob die Fähigkeiten des Menschen ausreichen, um einen gewissen Systemzustand zu sensieren. Bei der Untersuchung eines Bordnetzmanagementsystems im Zusammenhang mit der EPS ist daher vor allem von Interesse, ob und wann der Fahrer eine etwaige durch Energiemangel hervorgerufene Versteifung der Lenkung spürt. Ein Bordnetzmanagementsystem muss dann genau diese Zustände effektiv vermeiden.

Ermittlung
zulässige
Verzugszeiten

Zur Ermittlung der zulässigen (nicht spürbaren) Verzugszeiten werden daher verschiedene Testreihen mit dem Fahrsimulator des Lehrstuhls für Mechatronik durchgeführt. Die Lenkunterstützung wird dazu mit verschiedenen Verzögerungen beaufschlagt. Mit dieser verstimmten Lenkung werden dann die beiden Manöver „Lenken im Stand“ und „Doppelter Spurwechsel“ gefahren.

Die einzelnen Testpersonen werden nach der Fahrt im Simulator dazu befragt, wie sie die Lenkung bewerten. Dabei werden 10 Wahlmöglichkeiten von normal über ungewöhnlich bis hin zu störend freigestellt. Der verwendete Fragebogen ist in Anhang B.1 abgedruckt. Abbildung B.1 zeigt die gesamte Versuchsauswertung.

Es ist eine deutliche Abhängigkeit der Bewertung der Lenkung von der verwendeten Verzögerung in der Lenkunterstützung zu beobachten. Sehr geringe Verzögerungen werden nicht vom Fahrer wahrgenommen. Ab ca. 0,04 s bewerten einige Probanden die Lenkung als auffällig. Bei Werten über 0,06 s wird die Lenkung nicht mehr als normal eingestuft. Im Interval von 0,06 s bis 0,10 s bewerten die meisten Probanden die Lenkung als auffällig. Bei noch größeren Verzögerungszeiten wird die Lenkung als auffällig bis störend bewertet.

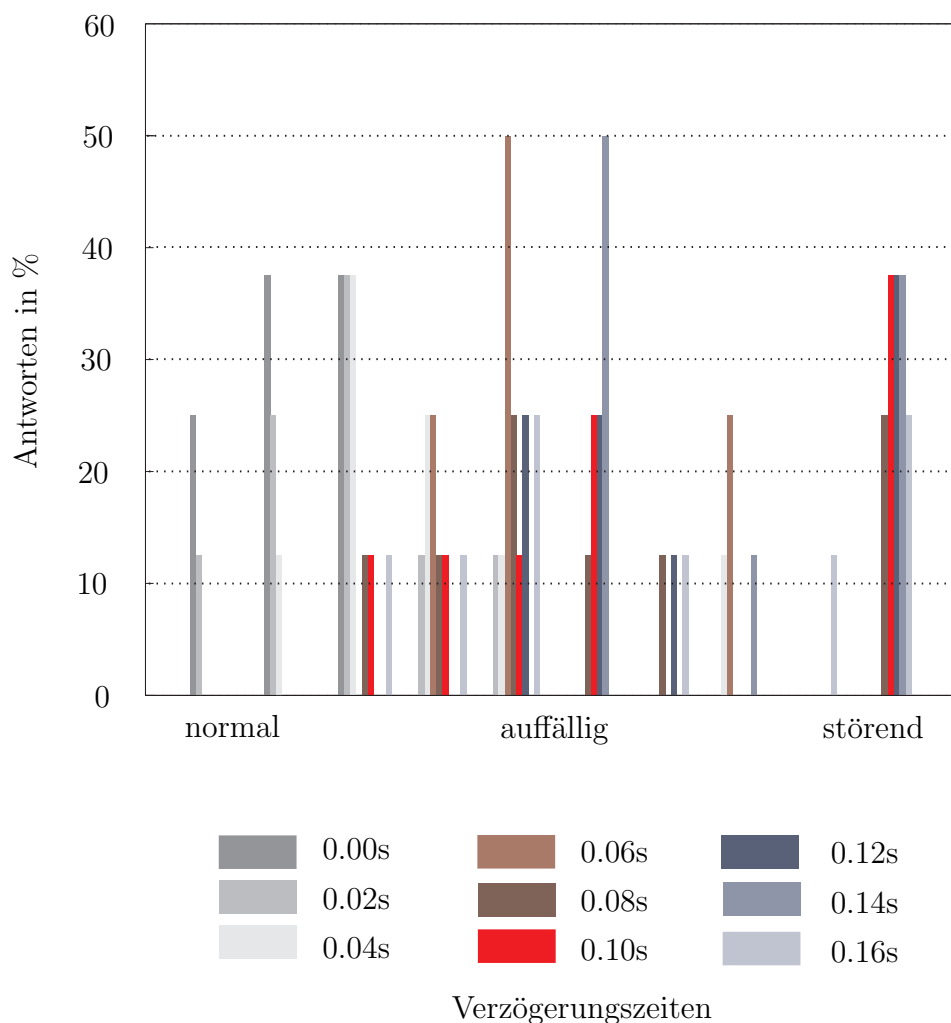


Abbildung B.1: Auswertung einer Totzeit in der Lenkunterstützung

Für das elektrische Energiemanagement in einen Kraftfahrzeug muss festgehalten werden, dass die zulässigen Verzögerungszeiten vom Auftreten einer Energiemangelsituation bis zu deren Beendigung (Komponente funktioniert wieder zu 100 %) abhängig von der jeweiligen Komponente sind. Für die Servounterstützung der Lenkung scheint diese Grenze bei ca. 0,05 s bis 0,10 s zu liegen. Hat die EPS über einen längeren Zeitraum nicht genügend Leistung zu Verfügung, so wird der Fahrer dies wahrnehmen und als unangenehm (störend) empfinden.

B.2 Simulatorstudie zur Beurteilung der Lenkung

Proband Nr.	Geschlecht	Alter in Jahren	jährliche Fahrleistung in km
1	männlich	30	10 000
2	männlich	30	25 000
3	männlich	33	25 000
4	männlich	22	5 000
5	männlich	31	11 000
6	männlich	28	18 000
7	männlich	22	35 000
8	männlich	33	20 000
9	männlich	45	13 000
10	männlich	30	20 000
11	weiblich	27	15 000
12	weiblich	34	15 000
13	weiblich	24	8 000
14	männlich	28	20 000
15	weiblich	27	25 000
16	männlich	21	10 000
17	weiblich	26	25 000
18	männlich	22	17 000
19	weiblich	26	12 000
20	weiblich	25	25 000
21	männlich	26	5 000
22	männlich	29	2 000
23	weiblich	60	27 000
24	männlich	63	30 000
25	weiblich	58	15 000
26	weiblich	55	35 000
27	männlich	63	7 000
28	männlich	59	30 000
29	männlich	63	20 000
30	männlich	83	20 000
31	weiblich	57	20 000
32	weiblich	47	18 000
33	weiblich	36	30 000
34	weiblich	43	20 000

Proband Nr.	Geschlecht	Alter in Jahren	jährliche Fahrleistung in km
35	weiblich	57	20 000
36	weiblich	39	15 000
37	weiblich	39	8 000
38	männlich	29	10 000

Tabelle B.2: Zusammensetzung der Probandengruppe

Die subjektive Bewertung der Lenkung während der Simulatorstudien kann mit Hilfe geeigneter Fragebögen durchgeführt werden. Der Aufbau eines Fragebogens ist in entscheidendem Maße für die Ergebnisse der Befragung mitverantwortlich [60]. An dieser Stelle wird der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Fragebogen vorgestellt.

Proband Nr.	
Alter	
Geschlecht	
Jährliche Fahrleistung	
Anzahl bisheriger Simulatorstudien	

Was denken Sie sollte getestet werden?				
stimme voll zu		stimme teil- weise zu		stimme nicht zu
Ich bewerte den Simulator als realitätsgetreu				
Das Umgebungsbild ist realistisch				
Das Lenkverhalten des Fahrzeugs entspricht dem eines realen Pkw				

Neben diesen generellen Fragen zum Simulator und dem Probanden wird zur gezielten Beurteilung der Lenkung der folgende Fragenkatalog eingesetzt.

Das Lenkverhalten erlebe ich als								
	Sehr			Weder noch			Sehr	
Ungewohnt								Vertraut
Dynamisch								Schwerfällig
Gefährlich								Sicher
Ruppig								Sanft
Kontrolliert								Unkontrolliert
Angeheim								Unangenehm
Irritierend								Beruhigend
Komfortabel								Unbequem

Tabelle B.4: Tabelle zur Befragung der Probanden während der Simulatortests

Literaturverzeichnis

- [1] Convention on Road Traffic. Wien, August 1968
- [2] *DIN 70000: Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten; Begriffe.* Berlin, Januar 1994
- [3] *ISO 3888-2: VDA-Spurwechseltest.* November 1997
- [4] *VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.* Beuth Verlag GmbH Berlin, Juni 2004
- [5] *70/220/EWG; 1970L0220-DE-01.01.2007-023.001-1 Richtlinie des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen.* Januar 2007
- [6] THE BOSTON CONSULTING GROUP: The Comeback of the Electric Car? How Real, How Soon, and What Must Happen Next. 2009. – Forschungsbericht
- [7] MC KINSEY & COMPANY: Der Trend zu energieeffizienten Pkw: Implikationen für die deutsche Automobielindustrie. 2009. – Forschungsbericht
- [8] ZF LENKSYSTEME GMBH: Homepage der ZF Lenksysteme GmbH. Richard-Bullinger-Straße 77 73527 Schönbach Gmünd, Juni 2011. – Forschungsbericht
- [9] ADAC: *Pannenstatistik.* www.adac.de, 2009
- [10] ADAC: *ADAC Pannenstatistik 2010.* www.adac.de. Version: 2010

- [11] BACKHAUS, K. ; ERICHSONS, B. ; PLINKE, W. ; WEIBER, R. : *Multivariate Analysemethoden Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer, 2008
- [12] BARSALI, S. ; CERAOLO, M. : Dynamical Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues. In: ENERGY CONVERSION, I. T. (Hrsg.): *IEEE Transaction on Energy Conversion* Bd. 17, 2002
- [13] BÜCHNER, S. : *Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen*, Technische Universität Dresden, Diss., 2008
- [14] BENDER, R. : Elektrische Energiespeicher für dynamische Anforderungen, Skript zum Versuch: Dimensionierung eines elektrischen Energiespeichers für Hybridfahrzeuge / technische Universität Clausthal. Clausthal, 2007. – Forschungsbericht
- [15] BÖGE, A. (Hrsg.): *Formeln und Tabellen Maschinenbau*. 2. Vieweg + Teubner, 2009
- [16] BÄKER, B. ; BÜCHNER, S. : *Vorlesung Kraftfahrzeugelektrik und -elektronik Skript Kapitel 2: Elektrisches Energiebordnetz*. Technische Universität Dresden, 2005
- [17] BÄKER, B. ; BÜCHNER, S. : *Skriptum zur Vorlesung: "Kraftfahrzeugelektrik und -elektronik"*. 2006
- [18] BOUCSEIN, W. ; THOM, E. : *Elektrodermale Aktivität: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Springer, 1988
- [19] BOUCSEIN, W. : *Electrodermal Activity*. Plenum Press, New York, 1992
- [20] BRANDT, T. : Virtuelle Testfahrt, Fahrsimulator-Konzept schließt Lücke zwischen Simulation und realen Versuchen mit Prototypen. In: *Automobil-Konstruktion* (2009), November
- [21] BRANDT, T. ; HIESGEN, G. ; HESSE, B. ; SCHRAMM, D. ; BRÖCKER, M. ; HEIZER, H. : Linear Stability and Performance Analysis of Shared Lane Keeping between Driver and Assistance System. In: *Proceedings of 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 2008)*. Kobe, Japan, 2008
- [22] BRÖCKER, J. ; BÖSING, M. ; BREDEHORN, M. ; CANDERS, W.-R. ; CEBULSKI, B. ; DOETSCH, P. ; DONCKER, R. ; KASHANI, F. : Elektrofahrzeuge: Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf. In: *VDE-Studie* (2010), April
- [23] BUNDESREGIERUNG: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. (2009), August

- [24] BURKE, A. : Key Issues for the Implementation of Ultracapacitors in Vehicle Applications / MIT/Industry Consortium on Advanced Automotive Electrical/Electronic Components and Systems. Seoul, Korea, 2005. – Forschungsbericht
- [25] CATTELL, R. B.: Experiments on the psychical correlate of the psychogalvanic reflex. In: *Britsch Journal of Psychology* 19 (1928), S. 357–386
- [26] CERAOLO, M. : New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries:. In: *IEEE Transactions on Power Systems* Bd. 15, 2000
- [27] CIERULLIES, J. : *Auslegungs- und Bewertungsmetrik für die elektrische Energieversorgung von Kraftfahrzeugen*, Technische Universität München, Diss., 2006
- [28] DANISCH, R. : Schwungrad-Speicher im Porsche 911 GT3R Hybrid mit Potential für Serieneinsatz. In: *ATZ - Automobiltechnisches Zeitschrift* 4 (2010), April
- [29] DONGES, E. ; NAAB, K. : Regelsysteme zur Fahrzeugführung und - Stabilisierung. In: *Automobiltechnik* (1996), Nr. 44(5), S. 226–236
- [30] DUDENHÖFFER, F. : Hochvolt-Energiespeicher: Konkurrenz in Deutschland, Europa und Asien. In: *ATZ elektronik* 04 (2010), August
- [31] DUDENHÖFFER, F. ; KRÜGER, M. ; SCHMALER, H. : Qualitäts-Herausforderung Stabiles Energiemanagement. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* 106 (2004), Januar, Nr. 1, S. 42–44
- [32] DUGOFF, H. ; FANCHER, P. S. ; SEGEL, L. : *Tire Performance Characteristics Affectiong Vehicle Response to Steering and Breakin Control Inputs*. The University of Michigan An Arbor, Michigan, USA, 1969
- [33] DURKEE, S. : *The effect of Simulation Attributes on Driver Perception and Behaviour*, Montana State University, Diplomarbeit, 2010
- [34] FABIS, M. : *Beitrag zum Energiemanagement in Kfz*, Technische Universität Berlin, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Diss., 2006
- [35] FISCHER, R. ; BUTZ, T. ; EHMANN, M. ; IRMSCHER, M. : Fahrermodellierung für Fahrdynamik und Verbrauchsberechnungen. In: *Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22 Mensch-Maschine-Systeme Nr. 28*. T. Jürgensohn and H. Kolrep, 2009, S. 1–14

- [36] FREY, S. : Medienwirkung nonverbaler Kommunikation im interkulturellen Vergleich: Eine Untersuchung zur visuellen Präsentation politischer Funktionsträger in Nachrichtensendungen aus der Bundesrepublik, Frankreich und den USA / Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). 1993. – Schlussbericht
- [37] FREY, S. : *Biometrische Evaluierung des Komfortempfindens bei Bremsvorgängen*. 2000. – Unveröffentlichter Forschungsbericht; auf Anfrage einsehbar
- [38] FREY, S. : Zur Frage der Pragmatik in der Mensch-Technik-Interaktion. In: *Mensch, Technik, Kommunikation: Beiträge zur Informatisierung in Gesellschaft, Recht, Ökonomie und Technik*. Alcatel-Lucent Stiftung, 2009, S. 12–44
- [39] FUHS, A. : *Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation*. CRC Press, 2009
- [40] GAEDT, L. ; LEYTEN, M. ; KOK, D. ; SPIJKER, E. : Impact of the micro-Hybrid Functions on Boltage Quality and Customer Acceptance. In: *VDI-Bericht Nr. 1907 „Elektronik im Kraftfahrzeug“*. Baden-Baden, 2005
- [41] GARAGE GAMES: *Torque Engine 3D*. www.garagegames.com, November 2010
- [42] GRAF, H.-M. : *Verfahren zur Steuerung der Energieverteilung in einem Verkehrsmittel und Verkehrsmittel, das dieses Verfahren umsetzt*. 2004
- [43] GÖTHEL, J. : Elektrisches Energiemanagement: Wege zur Systemoptimierung für die Elektrobilität. In: *4. VDI-Tagung Baden-Baden Spezial 2010, Elektrisches Fahren machbar machen (VDI-Berichte 2098)*, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, Oktober 2010, S. 51–63
- [44] HAFKEMEYER, M. ; ELDWAIK, F. ; HEIM, A. ; LIEBL, J. ; STAUBER, J. ; TRAUB, F. : Effiziente Dynamik durch intelligentes Energiemanagement-Strategien / BMW Group München. München, 2007. – Forschungsbericht
- [45] HAMANN, S. B. ; ELY, T. D. ; GRAFTON, S. T. ; KILTS, C. D.: Amygdala activity related to enhanced memory for pleasant and aversive stimuli. In: *Nature neuroscience* 3, S. 289–293
- [46] HANSEN, E. ; WALSTER, G. : *Global optimization using interval analysis*. CRC, 2004
- [47] HARRER, M. (Hrsg.) ; PFEFFER, P. (Hrsg.): *Lenkungsbandbuch*. Vieweg + Teubner, 2011

- [48] HEINEMANN, D. : *Strukturen von Battertie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät IV, Diss., 2007
- [49] HEINTEL, B. ; WAGNER, T. ; HOHN, G. : Agentenorientiertes dezentrales Energie- und Funktionsmanagement für Kfz. In: *Entwicklerforum Kfz-Elektronik*. Ludwigsburg/Stuttgart, Mai 2004
- [50] HENNEBERGER, G. : *Elektrische Motorausrüstung*. Vieweg Verlagsgesellschaft, 1990
- [51] HENRICHFREISE, H. ; JUSSEIT, J. ; NIESSEN, H. : Optimale Regelung einer elektromechanischen Servolenkung. In: *5. VDI Mechatronik Tagung 2003 Innovative Produktentwicklung* (2003), Mai
- [52] HESSE, B. ; HIESGEN, G. ; BRANDT, T. : A Multifunctional Tool for Designing the HMI of Mechatronic Products. In: *Adjunct Proceedings of AutomotiveUI 2009: First International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. Essen, Germany, September 2009
- [53] HESSE, B. ; HIESGEN, G. ; BRANDT, T. ; SCHRAMM, D. : Ein Fahr Simulator als Werkzeug zur frühzeitigen Eigenschaftsabsicherung von Mensch-zentrierten mechatronischen Systemen. In: *VDI Mechatronik 2009*, 2009
- [54] HIESGEN, G. ; UNTERREINER, M. ; HESSE, B. ; BRANDT, T. ; SCHRAMM, D. : Ein Werkzeug zur Frühzeitigen Integration des Fahrers in den Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen. In: *24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz, VDI-Berichte 2048*, 2008
- [55] JACKKEY, R. : A Simple, Effective Lead-Acid Battery modeling Process for Electrical System Component Selection. In: *The MathWorks Webinar* (2007)
- [56] JAMSON, H. : Driving simulation validity: issues of field of view and resolution. In: *Driving Simulators Conference*. Paris, France, 2000, S. 57–64
- [57] KEMENY, A. ; PENERAI, F. : Evaluation perception in driving simulation experiments. In: *Trends in Cognitive Sciences* 7 (2003), Nr. 1
- [58] KESSELS, J. : *Energy Management for Automotive Power Nets*, Technical University Eindhoven, Diss., 2007
- [59] KESSELS, J. ; KOOT, M. ; JAGER, B. de ; BOSCH, P. van d. ; ANEKE, N. ; KOK, D. : Energy Management for Electric Powernet in vehicles With a Conventional Drivetrain. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 15 (2007), S. 494–505

- [60] KIRCHHOFF, S. ; KUHNT, S. ; LIPP, P. ; SCHLAWIN, S. : *Der Fragebogen, Datenbasis, Konstruktion und Auswertung*. 5. VS Verlag, 2010
- [61] KÖNIG, W. : Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen. In: WINNER, H. (Hrsg.) ; HAKULI, S. (Hrsg.) ; WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme, Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 1. Vieweg & Teubner, 2009, S. 33–42
- [62] KNOTH, J. ; KRÜGER, R. : cologneE-mobil - Ford auf dem Weg zur Markteinführung von batterieelektrischen Fahrzeugen. In: *4. VDI-Tagung Baden-Baden Spezial 2010, Elektrisches Fahren machbar machen (VDI-Berichte 2098)*, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, Oktober 2010, S. 3–18
- [63] KOPPERS, M. ; HESSE, B. ; HIESGEN, G. : Einfluss verschiedener Nebenverbraucher auf Elektrofahrzeuge. In: *3. Wissenschaftsforum Mobilität, Future Trends in Mobility*, 2011
- [64] LANSINK, J. M. ; RICHARDS, J. E.: Heart rate and behavioral measures of attention in six-, nine-, and twelve-month-old infants during object exploration. In: *Child Development* (1997), August, S. 610–620
- [65] LOHNINGER, H. : *Grundlagen der Statistik*. <http://www.statistics4u.info/fundstat-germ/copyright.html>, Juni 2011
- [66] MATHWORKS: *xPC-Target Help*. <http://www.mathworks.de/products/xpctarget/>, November 2010
- [67] MEISSNER, E. ; RICHTER, G. : Battery Monitoring and Electrical Energy Management Precondition for future vehicle electricpower systems. In: *Journal of Power Sources* 116 (2003), S. 79–98
- [68] MIKELSONS, L. ; BRANDT, T. : Model-Based Driver-Vehicle Interaction Analysis. In: *10th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)* (2010)
- [69] MIT: MIT Technology Review / Massachusetts Institute of Technology. 2007. – Forschungsbericht
- [70] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H. : *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer Verlag, 2003
- [71] MULTHOFF, R. : Hinterachs-Luftfedersystem für leichte Nutzfahrzeuge. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 8 (2007)

- [72] NEUKUM, A. ; KRÜGER, H.-P. ; SCHULLER, J. : Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? In: *VDI-Berichte Nr. 1613 (2001). Der Fahrer im 21. Jahrhundert*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2001
- [73] OTTERBACH, R. : Effiziente Funktions- und Softwareentwicklung für mechatronische Systeme. In: *Mechatronik im Automobil*. Stuttgart, 2003
- [74] PACEJKA, H. : *Tyre and Vehicle Dynamics*. Bd. 2. Butterworth-Heinemann, 2006
- [75] PFAB, X. : Das Zweispannungs-Bordnetz, erste Ergebnisse aus gewählten Beispielen. Aachen : 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 1999
- [76] PRÖBSTLE, H. ; POLENOV, D. ; SIRCH, O. : Stabilisierung der Energieversorgung im Kraftfahrzeug. In: *ELKS 2008 Elektrische Leistungsvordnetze und Komponenten von Straßenfahrzeugen*, 2008
- [77] PRETZLAFF, H. : Elektromobilität: Deutschland soll Leitmarkt werden. In: *Stuttgarter Zeitung* (08.11.2010)
- [78] PROKASY, W. F. ; RASKIN, D. C.: Electrodermal activity in psychological research. In: *Academic Press* (1973)
- [79] RAO, S. S.: *Engineering Optimization; Theory and Practice*. 4. Hoboken, New Jersey, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2009
- [80] REIF, K. : *Automobilelektronik, Eine Einführung für Ingenieure*. 3. Wiesbaden : Vieweg & Teubner, ATZ/MTZ-Fachbuch, 2009
- [81] Kapitel 20. In: REIMANN, G. ; BRENNER, P. ; BÜRING, H. : *Lenkstellssysteme*. 1. Vieweg + Teubner, 2009, S. 287–312
- [82] RENSKI, A. : Identification of driver model parameters. In: *International Journal of occupational safety and ergonomics* 7 (2001), S. 79–90
- [83] RILL, G. : *Simulation von Kraftfahrzeugen*. Vieweg Verlag, 1994
- [84] ROBERT BOSCH GMBH (Hrsg.): *Autoelektrik, Autoelektronik: Systeme und Komponenten*. 4. Vieweg Verlag, 2002
- [85] RUNGE, W. ; GAEDKE, A. ; HEGER, M. ; VÄHNING, A. ; REUSS, H.-C. : Elektrisch lenken Notwendige Effizienzsteigerungen im Oberklassensegment. In: *ATZ extra Innovationen im Fahrzeug und Verkehr 2010* (2010), April, S. 68–74

-
- [86] SCHÄFER, H. : *Integrierter Starter-Generator, Das multifunktionale Bindeglied zwischen Bordnetz und Antriebsstrang im Kraftfahrzeug*. Haus der Technik, 2001
- [87] SCHÖLLMANN, M. (Hrsg.): *Energiemanagement und Bordnetze II: Innovative Ansätze für modernes Energiemanagement und zuverlässige Bordnetzarchitekturen*. Expert-Verlag, 2007
- [88] SCHMIDT, M. : Ein neues Energiemanagement-Konzept für das elektrische Bordnetz. In: *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* (2007), Januar, Nr. 1
- [89] SCHMIDT, M. : *Ein selbstadaptierender, dynamischer Energiemanagementansatz für das elektrische Kraftfahrzeugbordnetz*, Universität Kassel, Diss., 2009
- [90] SCHRAMM, D. ; HILLER, M. ; BARDINI, R. : *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. 1. Springer Verlag, 2010
- [91] SCHRAMM, D. ; KOPPERS, M. : Antriebsvielfalt der Zukunft. In: *UNIKATE, Universität Duisburg-Essen* (2011), Nr. 39, S. 8–19
- [92] SCHRÖDER, D. : *Elektrische Antriebe - Grundlagen*. 4. Springer Verlag, 2009
- [93] SCHÖTTLE, R. ; SCHRAMM, D. ; SCHENK, J. : Zukünftige Energiebordnetze im Kraftfahrzeug / VDI Berichte Nr. 1287. Schwieberdingen, 1996. – Forschungsbericht
- [94] SCHÖTTLE, R. ; THREIN, G. : Elektrisches Energiebordnetz: Gegenwart und Zukunft / VDI Berichte Nr. 1547. Schwieberdingen, 2000. – Forschungsbericht
- [95] SENSODRIVE GMBH (Hrsg.): *Betriebsanleitung SENSO-Wheel SD-LC*. Argelsrieder Feld 20, D-82234 Weßling: SENSODRIVE GmbH, November 2007
- [96] SHANNON, C. E.: A Mathematical Theory of Communication. In: *The Bell System Technical Journal* (1948)
- [97] SÖHNCHEN, K.-H. : *Entwurf und Simulation eines Energiemanagementsystems für Kraftfahrzeuge*, Universität Duisburg-Essen, Diplomarbeit, Juni 2011
- [98] SPRING, E. : *Elektrische Maschinen Eine Einführung*. 3. Springer Verlag, 2009

-
- [99] UNTERREINER, M. : *Modellbildung, Parametrierung und Simulation von Fahrzeugmodellen unterschiedlicher Komplexitätsgrade*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2011
- [100] WALLENTOWITZ, H. (Hrsg.) ; REIF, K. (Hrsg.): *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 1. Wiesbaden : Vieweg Verlag, ATZ/MTZ-Fachbuch, 2006
- [101] WALLENTOWITZ, H. ; FREIALDENHOVEN, A. ; OLSCHESKI, I. : *Strategien in der Automobilindustrie: Technologietrends und Marktentwicklungen*. 1. Wiesbaden : Vieweg & Teubner, ATZ/MTZ-Fachbuch, 2009
- [102] WALLENTOWITZ, H. ; FREIALDENHOVEN, A. ; OLSCHESKI, I. : *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. 1. Wiesbaden : Vieweg & Teubner Verlag, ATZ/MTZ-Fachbuch, 2010
- [103] WIETSCH, M. ; KLEY, F. ; DALLINGER, D. : Chancen und Herausforderungen der Elektromobilität. In: *4. VDI-Tagung Baden-Baden Spezial 2010, Elektrisches Fahren machbar machen (VDI-Berichte 2098)*, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, Oktober 2010, S. 3–18
- [104] WIPPICH, K. : *Elektrische Maschinen und Antriebe II Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten von Transformatoren, Asynchron- und Synchronmaschinen*
- [105] ZANTEN, A. T.: Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP). In: ISERMANN, R. (Hrsg.): *Fahrdynamik-Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. 1. Vieweg, ATZ/MTZ-Fachbuch, 2006, S. 169–211
- [106] ÖZBEK, M. : *Modeling, Simulation and Concept Studies of a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle Powertrain*, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Diss., 2010